

**IDENTIFICATION, CARACTERISATION ET  
DEVENIR DES DIFFERENTES COMPOSANTES DES  
EAUX PLUVIALES POTENTIELLEMENT TOXIQUES  
POUR LES MILIEUX AQUATIQUES**

Rapport final

Action 13 (DO-TOX) du Programme 2009  
au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau / ZABR

7 juin 2010

Auteurs :

**ENTPE** : Yves Perrodin, Houssemeddine Guedri,  
Ruth Angerville, Jérôme Guillemot

**CEMAGREF** : Pascal Breil, Thierry Fournier,  
Fabien Thollet, Mickael Lagouy

# SOMMAIRE

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Table des figures .....                                                                   | 2         |
| Table des tableaux.....                                                                   | 2         |
| Liste des abréviations.....                                                               | 3         |
| <b>1. Introduction.....</b>                                                               | <b>4</b>  |
| <b>1.1 Contexte .....</b>                                                                 | <b>4</b>  |
| <b>1.2 Objectifs de l'étude .....</b>                                                     | <b>4</b>  |
| <b>1.3 Plan du rapport.....</b>                                                           | <b>5</b>  |
| <b>2. Présentation des sites étudiés.....</b>                                             | <b>6</b>  |
| <b>2.1 Présentation du bassin versant du déversoir du Pont de la Barge à Grézieu.....</b> | <b>6</b>  |
| <b>2.2 Présentation du bassin versant du déversoir d'orage du Valvert à Ecully.....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>3. Résultats de l'étude hydrologique.....</b>                                          | <b>8</b>  |
| <b>3.1 Topographie des sites d'étude .....</b>                                            | <b>8</b>  |
| <b>3.2 Résultats.....</b>                                                                 | <b>9</b>  |
| <b>3.3 Conclusion .....</b>                                                               | <b>11</b> |
| <b>4. Caractérisation des échantillons.....</b>                                           | <b>12</b> |
| <b>4.1 Prélèvements.....</b>                                                              | <b>12</b> |
| <b>4.2 Préparation des échantillons .....</b>                                             | <b>12</b> |
| <b>5. Analyses physico-chimiques .....</b>                                                | <b>13</b> |
| <b>6. Les tests écotoxicologiques .....</b>                                               | <b>14</b> |
| <b>6.1 Présentation des essais.....</b>                                                   | <b>14</b> |
| 6.1.1 Essais sur la fraction « eau » .....                                                | 14        |
| 6.1.1.1 Crustacés : Daphnia magna (essai de toxicité aigu, 24h et 48h) .....              | 14        |
| 6.1.1.2 Bactéries : Vibrio fisheri (Microtox aigu 30 min) .....                           | 14        |
| 6.1.1.3 Rotifères : Brachionus calyciflorus (Toxkit chronique 48h).....                   | 15        |
| 6.1.1.4 Crustacés : Ceriodaphnia dubia (essai de toxicité chronique, 7j) .....            | 15        |
| 6.1.1.5 Algues : Pseudokirchneriella Subcapitata (Essai de toxicité chronique, 72h) ..... | 15        |
| 6.1.2 Essais sur la fraction « particules » .....                                         | 16        |
| 6.1.2.1 Bactéries : Vibrio fisheri (Microtox aigu phase solide 30 min) .....              | 16        |
| 6.1.2.2 Ostracodes : Heterocypris Incongruens (Toxkit chronique 5j) .....                 | 16        |
| <b>6.2 Résultats des essais écotoxicologiques.....</b>                                    | <b>18</b> |
| 6.2.1 Pour la fraction « eau » des échantillons de Grézieu .....                          | 18        |
| 6.2.2 Pour la fraction « particules » des échantillons de Grézieu .....                   | 19        |
| 6.2.3 Pour la fraction « eau » des échantillons d'Ecully .....                            | 20        |
| <b>7. Interprétation des résultats .....</b>                                              | <b>20</b> |
| <b>7.1 Analyse des résultats obtenus.....</b>                                             | <b>20</b> |
| 7.1.1 Hydrologie et physico-chimie .....                                                  | 20        |
| 7.1.2 Ecotoxicologie .....                                                                | 21        |
| <b>7.2 Recommandations pour la caractérisation de l'écotoxicité des DO .....</b>          | <b>22</b> |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                                                       | 26        |
| ANNEXES .....                                                                             | 49        |

## *Table des figures*

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 Schéma du bassin versant et de son exutoire.....                                                                                | 6  |
| Figure 2 Photo de la Chaudanne au niveau du Pont de la Barge .....                                                                       | 7  |
| Figure 3 Carte d'occupation des sols sur le bassin versant .....                                                                         | 7  |
| Figure 4 Photo de l'exutoire du déversoir d'Ecully.....                                                                                  | 8  |
| Figure 5 Profil en long d'un bief du ruisseau des Planches (Ecully).....                                                                 | 9  |
| Figure 6 Points de ligne d'eau sur le ruisseau de la Chaudanne .....                                                                     | 9  |
| Figure 7 Temps de transfert d'un soluté dans un seuil de cours d'eau .....                                                               | 11 |
| Figure 8 Station de prélèvement de l'OTHU (Sites OTHU).....                                                                              | 12 |
| Figure 9 Résultats des essais écotoxicologiques sur la fraction « eau » de Grézieu.....                                                  | 18 |
| Figure 10 Résultats de l'essai rotifère ( <i>Brachionus calyciflorus</i> , 48h) sur la fraction « eau »<br>de Grézieu.....               | 18 |
| Figure 11 Résultats des essais écotoxicologiques sur la fraction « particules », vis-à-vis de<br><i>Vibrio Fisheri</i> , de Grézieu..... | 19 |
| Figure 12 Résultats des essais écotoxicologiques sur la fraction « eau » d'Ecully.....                                                   | 20 |
| Figure 13 Logigramme des actions à mener pour la caractérisation de l'écotoxicité d'un DO<br>.....                                       | 24 |

## *Table des tableaux*

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 Analyses physico-chimiques de la fraction « eau » des échantillons de RUTP des<br>DO de Grézieu de d'Ecully..... | 13 |
| Tableau 2 Analyses des métaux des particules de l'échantillon de RUTP des DO de<br>Grézieu de d'Ecully.....                | 14 |
| Tableau 3 Essais écotoxicologiques réalisés et préparation de l'échantillon de RUTP des<br>DO de Grézieu et d'Ecully.....  | 17 |

### *Liste des abréviations*

|                  |                                                                                                                                                                                                  |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADEME            | Agence pour le DEveloppement et la Maîtrise de l'Energie                                                                                                                                         |
| Bc               | <i>Brachionus calyciflorus</i> (rotifère F)                                                                                                                                                      |
| Cd               | Cadmium                                                                                                                                                                                          |
| Cdu              | <i>Ceriodaphnia dubia</i> ( <i>cerio</i> )                                                                                                                                                       |
| CE <sub>20</sub> | Concentration Efficace 20 %. Concentration en polluant qui cause un effet toxique (néfaste) donné chez 20 % des individus exposés (pour une espèce donnée) après un temps d'exposition normalisé |
| CEMAGREF         | Centre d'Etudes du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts                                                                                                                       |
| Cu               | Cuivre                                                                                                                                                                                           |
| Dm               | <i>Daphnia magna Strauss</i> (daphnie)                                                                                                                                                           |
| ENTPE            | Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat                                                                                                                                                    |
| Hi               | <i>Heterocypris incongruens</i> (ostracode F)                                                                                                                                                    |
| i                | Gradient hydraulique                                                                                                                                                                             |
| IR               | Indice de Risque                                                                                                                                                                                 |
| K                | Conductivité hydraulique                                                                                                                                                                         |
| LGCIÉ            | Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale (INSA de Lyon)                                                                                                                       |
| LSE              | Laboratoire des Sciences de l'Environnement (ENTPE, France)                                                                                                                                      |
| NF               | Norme Française                                                                                                                                                                                  |
| OTHU             | Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine                                                                                                                                                    |
| Pb               | Plomb                                                                                                                                                                                            |
| pH               | Potentiel Hydrogène                                                                                                                                                                              |
| POLDEN           | POLLution, Déchets et ENvironnement                                                                                                                                                              |
| Ps               | <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> (algue Ps)                                                                                                                                                |
| q                | Débit spécifique                                                                                                                                                                                 |
| RUTP             | Rejets Urbains par Temps de Pluie ou Rejets Urbains de Temps de Pluie                                                                                                                            |
| Vf               | <i>Vibrio fischeri</i>                                                                                                                                                                           |
| Zn               | Zinc                                                                                                                                                                                             |

# 1. Introduction

## 1.1 Contexte

Les rejets urbains par temps de pluie (RUTP) représentent aujourd'hui un problème écologique considérable. Composés d'eaux pluviales urbaines et bien souvent d'une partie des eaux usées urbaines, ils drainent une partie importante des pollutions anthropiques susceptibles d'avoir des impacts sur la santé humaine et environnementale.

Parmi les RUTP, les déversoirs d'orage (DO) constituent des exutoires incontournables de certains réseaux d'assainissement unitaires dans la gestion des eaux pluviales. Leur fonction est de rejeter une partie du débit transitant dans le réseau vers les cours d'eau, que les ouvrages de traitement des eaux ne peuvent accueillir lors des événements pluvieux importants. Ce rôle stratégique, s'il est mal maîtrisé, peut être la source de dysfonctionnements environnementaux.

Les données de la littérature soulignent que le déversement des DO dans les milieux aquatiques peut porter atteinte à la qualité physico chimique des biotopes [Chocat et al., 1993] et affecter les organismes à différents niveaux d'organisation biologique [Mulliss et al., 1997], [Angerville, 2009].

Sachant que les directives européennes obligent les états membres à adapter leur législation à une maîtrise des rejets anthropiques et à une reconquête de la qualité des eaux, il est nécessaire d'étudier les risques liés aux déversoirs d'orage en adoptant une méthode de caractérisation adéquate pour ces installations.

## 1.2 Objectifs de l'étude

L'objectif global de cette étude est l'élaboration d'une note méthodologique sur le suivi écotoxicologique des DO qui se déversent dans les petits cours d'eau.

La liste des « sous-objectifs », fixés au départ de l'étude, est la suivante :

- caractérisation de la localisation des polluants toxiques dans les différentes fractions des eaux pluviales,
- meilleure connaissance des temps de séjour et du mode d'action des différentes fractions potentiellement écotoxiques (fractions particulières et solubles) des eaux pluviales sur les organismes des cours d'eau périurbains,
- interprétation de ces informations en vue d'une gestion optimisée des eaux pluviales,
- caractérisation de l'écotoxicité des fractions solubles et granulaires émises par deux déversoirs d'orage instrumentés de l'OTHU (Grézieu + Ecully),
- étude du devenir de ces fractions dans le cours d'eau périurbain. notamment par mesure directe des variables de contrôle hydraulique et des indicateurs d'échange entre la colonne d'eau et le substrat (température, conductivité électrique, pH...),
- conclusion sur le rôle des toxiques issus des eaux pluviales dans l'impact sur les organismes aquatiques.
- recommandations sur la gestion des fractions solubles et particulières des eaux pluviales.

### **1.3 Plan du rapport**

Ce rapport est composé de cinq parties.

La première partie présente les deux sites pilotes étudiés, à savoir :

- le déversoir d'orage du Pont de la Barge à Grézieu-la-Varenne,
- le déversoir d'orage du Valvert à Ecully.

La deuxième partie correspond à une synthèse des résultats de l'étude hydrologique menée sur les deux cours d'eau (la Chaudanne à Grézieu et le ruisseau des Planches à Ecully). Ces résultats seront utilisés en vue de la définition du cahier des charges de l'étude écotoxicologique (identification des compartiments cibles concernés, temps de séjour dans ces compartiments,...). Une présentation détaillée de l'étude hydrologique figure en annexe de ce rapport.

La troisième partie est consacrée à la présentation de la caractérisation des échantillons prélevés dans les deux sites pilotes (mode de prélèvements, analyses physico-chimiques et écotoxicologiques).

Dans la quatrième partie, nous interpréterons et analyserons les résultats obtenus dans les différentes parties de l'étude.

La dernière partie correspond à la rédaction de la note méthodologique proposée pour le suivi des DO se déversant dans les petits cours d'eau péri-urbains.

## 2. Présentation des sites étudiés

### 2.1 Présentation du bassin versant du déversoir du Pont de la Barge à Grézieu

Ce bassin versant, situé sur la commune de Grézieu la Varenne, s'étend de la source de la Chaudanne jusqu'à l'exutoire du bassin versant, le déversoir du Pont de la Barge. Il a une superficie de 280 hectares et son altitude va de 443 (haut du bassin versant) à 306 mètres (au niveau du déversoir). Son réseau d'assainissement est totalement unitaire.

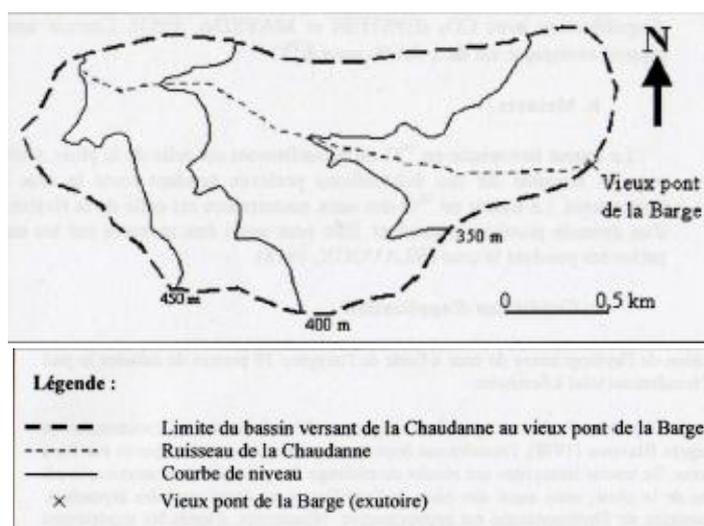


Figure 1 Schématisation du bassin versant et de son exutoire

Quant à l'occupation des sols, sa partie haute de 220 hectares est rurale avec des pentes importantes, et sa partie basse de 60 hectares de type urbain avec des pentes plus faibles. Le coefficient d'imperméabilisation de sa partie basse est de 40% [Orczyk, 2001]. La SAU (Surface Agricole Utile) représente 80% de la surface totale [Bernoud, 1998]

Le ruisseau a une pente moyenne de 0,5m/m, sa largeur varie de 50 cm à 1,5m. En période estivale (période d'étiage), le débit du ruisseau est presque nul (de 0 à 10 l/s). Un sous écoulement important existe ; il est dû à une nappe d'accompagnement [Gnouma, 2006], [Vivier, 2006].

Le ruisseau développe une géomorphologie naturelle tant au niveau de l'alternance des faciès que de la granulométrie et présente par endroit des sapements de berge, des élargissements et des incisions situées en proximité aval des points de rejets de temps de pluie.



Figure 2 Photo de la Chaudanne au niveau du Pont de la Barge

## 2.2 Présentation du bassin versant du déversoir d'orage du Valvert à Ecully

Le bassin versant, qui est la source du déversoir d'orage du Valvert à Ecully, mesure 245 hectares. Il est caractéristique d'un milieu urbain moyennement dense. (GRAIE, 2005).

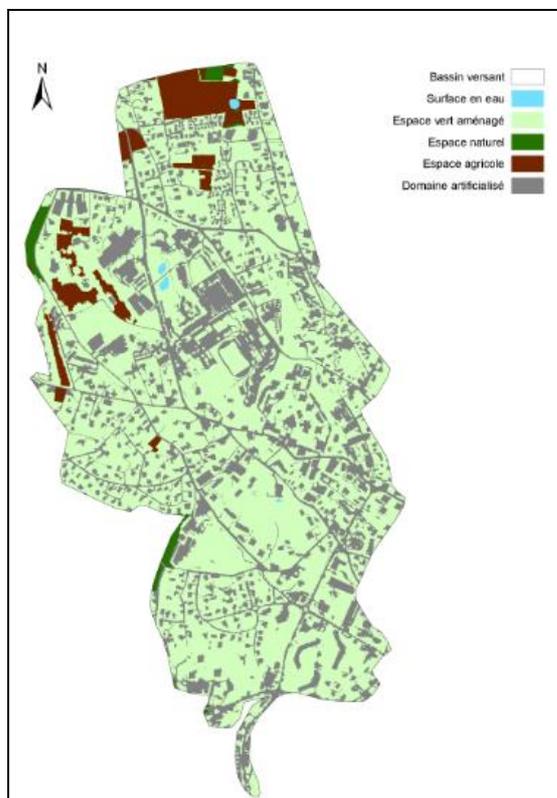


Figure 3 Carte d'occupation des sols sur le bassin versant (INSA LGCIE)

Le réseau d'assainissement est majoritairement unitaire, il comprend 5 petits déversoirs d'orage et celui du Valvert à l'exutoire. Ce dernier se jette comme les cinq autres dans le ruisseau du Trouillat. Il y déverse donc des eaux pluviales ainsi que des eaux usées.



Figure 4 Photo de l'exutoire du déversoir d'Ecully

### **3. Résultats de l'étude hydrologique**

Dans cette partie, il s'agit de réaliser des mesures hydrologiques sur le terrain afin de récolter les données servant à calculer le temps de séjour des RUTP dans la zone hyporhéique et leur temps de transit en fonction du débit de la rivière.

#### **3.1 Topographie des sites d'étude**

Les campagnes topographiques ont été réalisées en septembre 2009. Nous sommes à cette époque en condition de reprise des débits après l'étiage estival. Les relevés ont été concentrés sur chaque site autour d'une séquence plat courant-seuil-mouille afin d'établir les caractéristiques géométriques propices aux échanges hyporhéiques.

Pour le ruisseau des Planches à Ecully, l'amont de la séquence est situé 36 mètres en aval du déversoir d'orage. La pente moyenne est de 1.8% avec des pentes locales de 5 à 7% en aval des deux seuils naturels de ce profil. La matrice grossière est plus développée que sur la Chaudanne avec des galets et blocs pluri-centimétriques. La largeur moyenne du cours d'eau est d'environ 4 m.

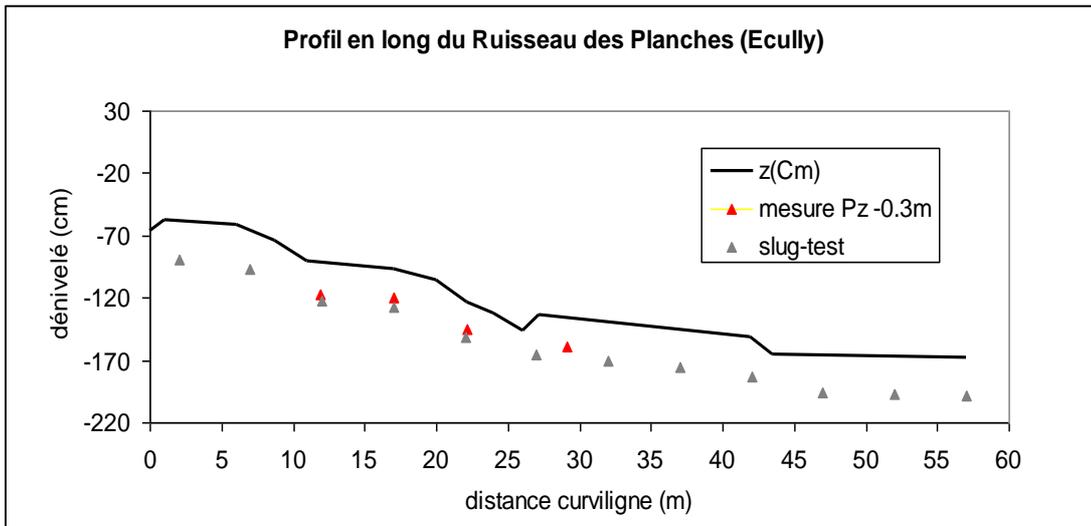


Figure 5 Profil en long d'un bief du ruisseau des Planches (Ecully)

Le début du profil démarre 31 mètres en aval du déversoir et présente une succession rapide de faciès caractéristiques de cours d'eau à énergie : plat-> seuil-> plat-> seuil-> mouille-> plat courant-> seuil -> plat -> seuil (-> mouille).

### 3.2 Résultats

Plusieurs mesures ont été réalisées sur le terrain :

- Le profil en long et la pente du ruisseau,
- La conductivité hydraulique (K) du substrat (réalisées tous les 5 mètres en utilisant la méthode du slug-tests, voir annexes),
- Le débit (pour la Chaudanne),
- Le gradient hydraulique (i) à partir de la ligne d'eau,
- Les points de ligne d'eau (Figure 6).
- La physico-chimie de la zone hyporhéique

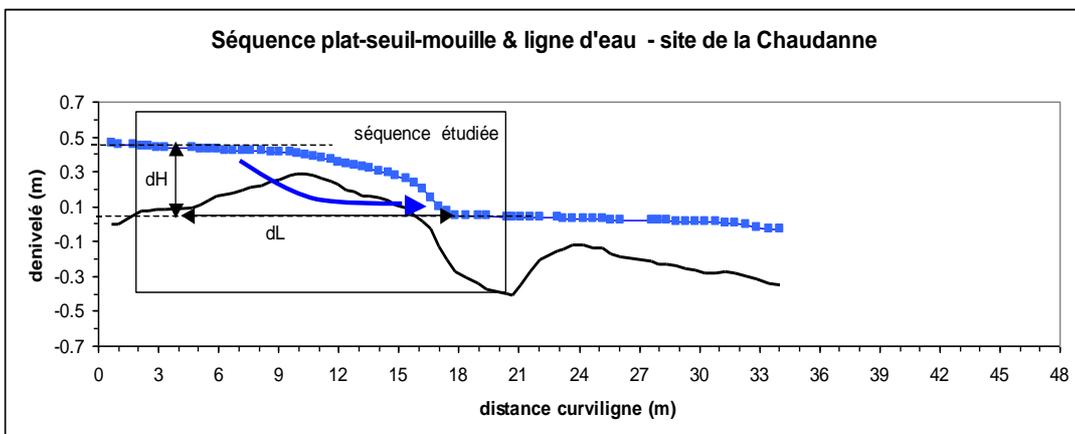


Figure 6 Points de ligne d'eau sur le ruisseau de la Chaudanne

A partir de ces données nous pouvons calculer la vitesse d'écoulement en milieux poreux. Elle est liée à la porosité du milieu, à la connectivité entre les pores, à la viscosité cinématique du fluide, à la distance traversée et à la différence de charge hydraulique appliquée. Pour un milieu poreux et uniforme, elle est donnée par la loi de Darcy.

$$q = k * \frac{H_A - H_B}{L} = ki \quad \text{Eq 1}$$

Où :  $q$  représente le débit spécifique ou débit par unité de surface (m/s)

$k$  la conductivité hydraulique (m/s)

$HA-HB$  la différence de charge hydraulique (m)

$L$  la distance parcourue par l'eau entre A et B (m)

$i$  est appelé gradient hydraulique

Les temps de transit d'un soluté dans les seuils sélectionnés pour les deux sites et dans les conditions de débit qui correspondent aux lignes d'eau utilisées sont :

Pour  $K = 1E-3$  m/s et porosité moyenne=30%

Ruisseau des Planches :  $dh= 0.4m$  ;  $dL= 12m$  ;  $q$  spécifique =  $3.34 E-5$  m/s.

$V= 9.6$  m/j, soit pour les 12 m de substrat à traverser une durée de 30 heures.

Ruisseau de la Chaudanne :  $dh= 0.4m$  ;  $dL= 13.5m$  ;  $q$  spécifique =  $9.5 E-6$  m/s.

$V= 2.7$  m/j, soit pour les 13.5 m de substrat à traverser une durée de 64 heures.

Les deux seuils sélectionnés se révèlent être relativement proches sur le plan des propriétés physiques. Il reste que c'est la ligne d'eau qui va imposer les temps de transit en variant avec les débits. Pour la Chaudanne, il est possible d'avoir une perception dynamique de la vitesse de transit. Nous utilisons pour cela un suivi en continu de la ligne d'eau sur plusieurs mois. Dans la figure suivante, seuls les gradients mesurés avec un débit non nul sont représentés. Le cas des gradients hors débit est aussi intéressant à traiter pour étudier le devenir des polluants liés aux rejets de temps pluie mais cela constitue une autre problématique en terme d'approche hydraulique. Les débits nuls représentent 40% du temps en moyenne sur une année pour les petits cours de l'ouest lyonnais.

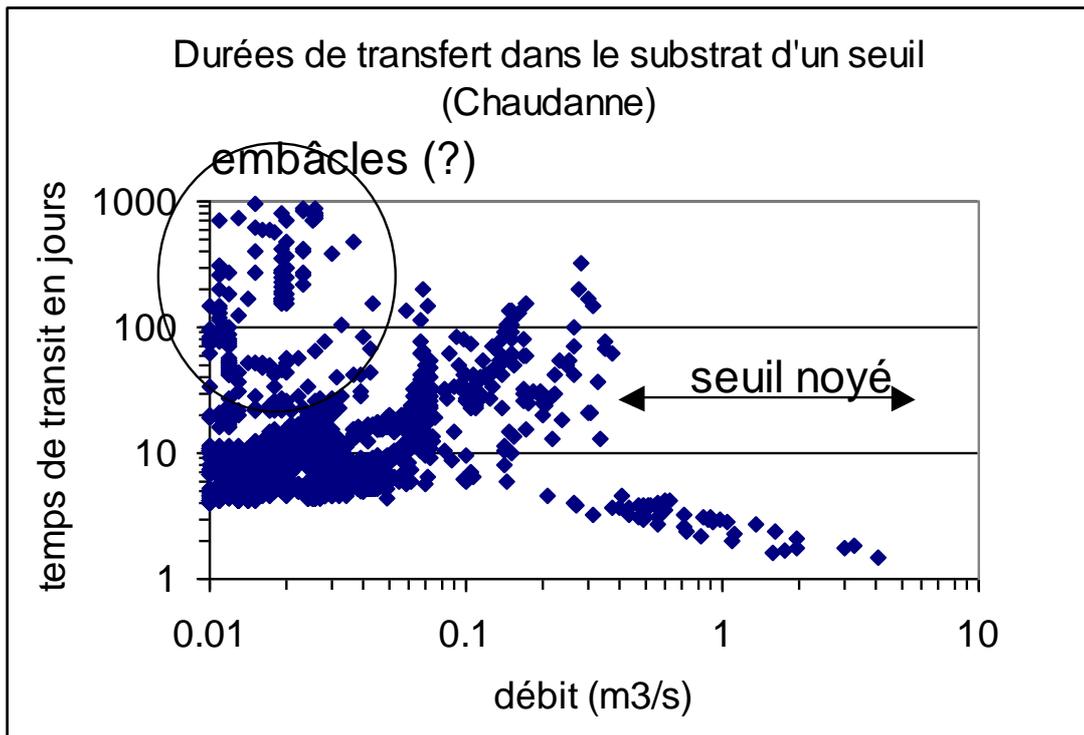


Figure 7 Temps de transfert d'un soluté dans un seuil de cours d'eau

On observe que les temps sont de l'ordre de 1,5 à 2 jours pour les forts débits et peuvent varier entre 10 et 100 jours pour les débits faibles à moyens.

Les durées de 100 à 1000 jours n'ont pas de réalité temporelle : ces valeurs correspondent à des lignes d'eau très planes (gradient faible) associées à des débits faibles. Il peut s'agir d'embâcles consécutifs à des crues mais leur durée de vie n'est souvent que de quelques semaines, jusqu'à une prochaine crue. Pour les forts débits, la pente de la ligne d'eau n'est plus contrôlée par le seuil qui est alors dit « noyé ».

Il convient d'ajouter que l'hypothèse réaliste d'une conductivité hydraulique moyenne de 0,001 m/s est applicable aux seuils naturels. Des trajets et temps de séjour plus longs sont vraisemblables dans les autres faciès morphologiques.

### 3.3 Conclusion

Les travaux réalisés sur des sites expérimentaux et leur modélisation conduisent aux principales conclusions suivantes :

- Les échanges rapides entre la colonne d'eau et le substrat sont localisés aux alentours des ruptures topographiques convexes ou seuils morphologiques,
- Les échanges dans ces ruptures sont persistants et relativement constants dans le temps par comparaison aux échanges latéraux entre le cours d'eau et sa nappe d'accompagnement,
- Les échanges augmentent avec le débit,

- Les échanges augmentent avec la pente moyenne du cours d'eau,
- Les échanges augmentent avec la fréquence des seuils dans le profil en long,
- Les temps de transit des eaux pluviales au niveau des seuils morphologiques atteignent des valeurs de l'ordre de 10 à 100 jours pour les débits faibles à moyens, et les temps de transit dans les autres faciès morphologiques sont supérieurs à ces valeurs.

## 4. Caractérisation des échantillons

### 4.1 Prélèvements

Les prélèvements de RUTP ont été effectués à l'aide d'un préleveur automatique de l'OTHU. Il se déclenche dès qu'une « surverse » du déversoir d'orage est détectée. Le préleveur remplit « à la file » des flacons de 1 litre, et ce jusqu' à atteindre la limite de stockage de 24 litres ou l'arrêt du déversement.

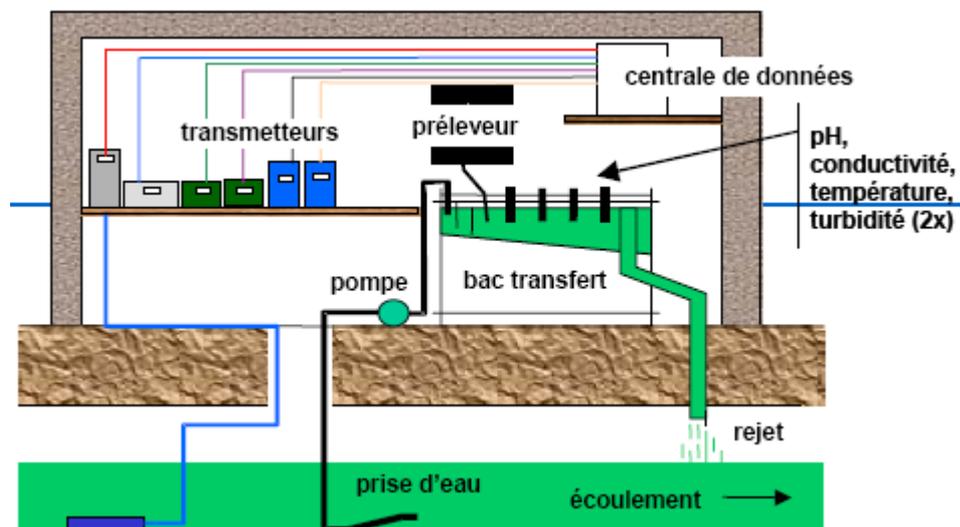


Figure 8 Station de prélèvement de l'OTHU

### 4.2 Préparation des échantillons

Tous les flacons de rejets bruts ont été congelés immédiatement dans les flacons de 500 ml, le jour des prélèvements. Leur décongélation a commencé la veille de leur utilisation.

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au CEMAGREF de Lyon et au Laboratoire des Sciences de L'Environnement de l'ENTPE. Les analyses écotoxicologiques ont été réalisées au Laboratoire des Sciences de L'Environnement de l'ENTPE et au sein de l'équipe POLDEN de l'INSA de Lyon.

Pour les besoins de certaines caractérisations, la fraction particulaire a été séparée de la fraction dissoute par filtration à 1,2 µm. Pour faciliter cette opération, elle a été précédée d'une centrifugation à 9000 g pendant 15 minutes.

Au final; on dispose donc de caractérisations effectuées sur les eaux dites « brutes » (eaux non filtrées), sur les eaux « filtrées » (eaux filtrées à 1,2 µm<sup>1</sup>), ainsi que sur les « particules » résultant de la filtration à 1,2 µm.

Dans ce rapport, les résultats obtenus sur les échantillons de la campagne de prélèvements de juin 2009 sont complétés par des données issues de travaux internes du Laboratoire des Sciences de l'Environnement de l'ENTPE, effectués sur des échantillons prélevés en 2007 (thèse de doctorat de Ruth Angerville, 2009). Cela permet d'enrichir le rapport, via l'augmentation du nombre de données disponibles, et via la comparaison des résultats obtenus lors deux différentes périodes de prélèvement.

## 5. Analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques réalisées sur les eaux « brutes » et « filtrées » sont regroupées dans le tableau ci-après.

|                     | Grézieu (2007) | Grézieu (2009) | Ecully (2009) |
|---------------------|----------------|----------------|---------------|
| pH                  | [7.7 ; 7.9]    |                |               |
| Conductivité, µS/cm | [650 ; 970]    |                | 326           |
| Phosphate, mg/l     | [7.1 ; 10.3]   |                |               |
| Nitrates, mg/l      | [2.2 ; 8.3]    |                |               |
| Ammonium, mg/l      | [18.3 ; 25.1]  | [11.6 ; 12.9]  | [25.2 ; 31.6] |
| Zn, µg/l            |                |                |               |
| Eaux brutes         | 450            | 230            | 135.79        |
| Filtrées            | 80             | ND             | 28.21         |
| Cd, µg/l            |                |                |               |
| Eaux brutes         | 0.3            | 0.32           | 0.12          |
| Filtrées            | ND             | ND             | 0.03          |
| Cu, µg/l            |                |                |               |
| Eaux brutes         | 160            | 60             | 40            |
| Filtrées            | 80             | 18.52          | 9.06          |
| Pb, µg/l            |                |                |               |
| Eaux brutes         | 34             | 8.7            | 11.42         |
| Filtrées            | 0.6            | 0.32           | 0.42          |

Tableau 1 : Analyses physico-chimiques des échantillons de RUTP des DO de Grézieu et d'Ecully

Le tableau 2 ci-dessous présente les concentrations en métaux lourds mesurées dans la fraction particulaire des échantillons de RUTP étudiés. Ces analyses ont été réalisées sur les particules collectées suite à la filtration à 1,2 µm de l'échantillon de RUTP.

<sup>1</sup> Sauf mention contraire, précisée dans le texte, pour une mesure particulière : exemple filtration à 0,45 µm imposée pour les bio-essais sur *V. fischeri*.

|             | Grézieu (2007) | Grézieu (2009) | Ecully (2009) |
|-------------|----------------|----------------|---------------|
| Zn, mg/kgMS | 1190           | 1450           | 140           |
| Cd, mg/kgMS | 0.7            | 1.26           | 0.58          |
| Cu, mg/kgMS | 420            | 236.3          | 40.4          |
| Pb, mg/kgMS | 92             | 56.6           | 13.8          |

Tableau 2 : Analyses des métaux des particules des RUTP des DO de Grézieu et d'Ecully

## 6. Les tests écotoxicologiques

### 6.1 Présentation des essais

#### 6.1.1 Essais sur la fraction « eau »

##### 6.1.1.1 Crustacés : *Daphnia magna* (essai de toxicité aigu, 24h et 48h)

Les daphnies, au sens large, connues également sous le nom de « puces d'eau », sont des petits crustacés fréquemment rencontrés dans les eaux douces. Ces micro-crustacés d'eau douce sont de l'ordre des *Cladocera*. Herbivores ou détritivores, les Cladocères assurent une fonction importante dans les transferts de matière et d'énergie de bon nombre d'écosystèmes. Ils prennent part à l'alimentation des poissons planctophages ou omnivores, mais également à celles d'alevins ou d'invertébrés aquatiques [Santiago *et al.*, 2002].

Leur immobilisation constitue une réponse d'exploitation facile pour une mesure de toxicité sachant que l'inhibition de la mobilité précède la mort dans la majorité des cas. L'essai *Daphnia magna* est un essai de toxicité aiguë. Il permet de déterminer la concentration qui immobilise, sur la période d'essai, x% des daphnies mises en expérimentation. Cet essai est réalisé suivant les prescriptions de la norme internationale [NF EN ISO 6341 (T 90-301), 1996].

Les périodes d'essai sont de 24h et de 48h. Les résultats seront présentés ici sous la forme de CE<sub>20</sub> (concentration qui immobilise, sur la période d'essai, 20% des Dm mises en expérimentation).

Un des avantages majeurs de cet essai est de pouvoir travailler sur des échantillons non filtrés.

##### 6.1.1.2 Bactéries : *Vibrio fischeri* (Microtox aigu 30 min)

L'organisme aquatique *Vibrio fischeri*, anciennement dénommé *Photobacterium phosphoreum*, est un décomposeur. C'est une bactérie marine qui émet naturellement de la lumière, phénomène dénommé bioluminescence ou plus simplement luminescence. Cette bactérie est une espèce ubiquiste des océans, non pathogène pour l'homme et les mammifères.

L'inhibition de la luminescence peut être interprétée comme une perturbation de ces processus métaboliques. Cet essai est un test de toxicité aiguë qui a été réalisé d'après la norme NF EN ISO 11348-3 [1999].

Les résultats seront présentés sous la forme de CE<sub>20</sub> (concentration qui inhibe de 20% la luminescence de la suspension de bactéries mise en expérimentation durant la période d'essai).

#### 6.1.1.3 Rotifères : *Brachionus calyciflorus* (Toxkit chronique 48h)

Les rotifères sont des métazoaires très communs dans le plancton des eaux douces. Ils ont une grande importance en aquaculture car ils servent d'aliment aux alevins. *B. calyciflorus* appartient au compartiment des décomposeurs et des détritivores.

Le bio-essai réalisé en 48h avec l'organisme *B. calyciflorus* est un test de toxicité chronique qui peut être mis en œuvre selon les prescriptions du projet de norme PR [NF ISO 20666 (T 90-334), 2007] ou selon les indications du manuel standard du Rotoxkit™ F - Chronic Toxicity Test for Freshwater (Essai de toxicité chronique vis-à-vis de *Brachionus calyciflorus*) [MicroBioTests Inc., 2006].

Les résultats seront présentés ici sous la forme de CE<sub>20</sub> (concentration qui inhibe de 20% la croissance de la population de rotifères Bc mise en expérimentation durant la période d'essai). L'essai est préférentiellement réalisé sur échantillon filtré, mais il est possible de tester les eaux brutes si elles ne sont pas trop chargées en particules.

#### 6.1.1.4 Crustacés : *Ceriodaphnia dubia* (essai de toxicité chronique, 7j)

Cet essai permet de déterminer la toxicité chronique vis-à-vis de *Ceriodaphnia dubia* (Cdu) en se basant sur l'inhibition de la croissance de la population en 7 jours. Il a été réalisé ici suivant les prescriptions de la norme [NF T 90-376, 2000].

La brièveté de cet essai de toxicité chronique (par rapport à l'essai *D. magna* 21j, par exemple), les faibles volumes utilisés et le renouvellement périodique des solutions d'essai constituent quelques-uns des atouts qui portent à le retenir dans une batterie de bio-essais [NF T 90-376, 2000] ; [INERIS, 2003c].

Il ne permet toutefois pas de travailler sur des échantillons d'eau non filtrés.

#### 6.1.1.5 Algues : *Pseudokirchneriella Subcapitata* (Essai de toxicité chronique, 72h)

Les micro-organismes sont connus pour être à la base des écosystèmes aquatiques mais également en raison de leur grande importance écologique [Gilbin, 2001]. Les algues unicellulaires, dont l'algue d'eau douce *Pseudokirchneriella subcapitata* (Ps), appartiennent à ce groupe d'organismes. Les algues sont des producteurs primaires, premier maillon du réseau trophique.

Capable de se multiplier jusqu'à 3 fois par jour, cette algue présente l'intérêt de pouvoir caractériser rapidement une toxicité chronique à un niveau trophique primordial [US EPA, 1978] ; [Nygaard *et al.*, 1986] ; [Santiago *et al.*, 2002].

L'essai d'inhibition de la croissance de l'algue *Pseudokirchneriella subcapitata* (Ps) en 72 h est un essai de toxicité chronique qui permet d'évaluer la concentration initiale de la solution testée qui inhibe la croissance de la population algale mise en expérimentation. Cet essai a été réalisé suivant les prescriptions de la norme [NF T 90-375, 1998].

Les résultats seront présentés sous la forme de CE<sub>20</sub> (concentration qui inhibe de 20% la croissance de la population d'algues Ps mise en expérimentation durant la période d'essai).

## 6.1.2 Essais sur la fraction « particules » des effluents

### 6.1.2.1 Bactéries : *Vibrio fischeri* (Test Microtox- Phase solide 30min)

Cet essai est un test de toxicité aiguë qui permet de mettre en évidence les effets d'une matrice solide de type sédiment vis-à-vis de l'organisme *V. fischeri* (Vf). La mise en œuvre de ce bio-essai permet ici de détecter la toxicité qui est liée à la fraction particulaire des échantillons de RUTP.

Dans le cadre de notre étude, nous avons adopté les mêmes critères et la même démarche qui permettent de valider l'essai sur phase liquide. Ces derniers figurent dans la norme [NF EN ISO 11348-3, 1999]. Les résultats seront présentés ici sous la forme de CE<sub>20</sub> (concentration qui inhibe de 20% de la luminescence de la suspension de bactéries mise en expérimentation durant la période d'essai).

### 6.1.2.2 Ostracodes : *Heterocypris Incongruens* (Toxkit chronique 5j)

Les ostracodes sont de minuscules arthropodes qui appartiennent au *phylum* des crustacés. Ils possèdent des carapaces constituées par deux coquilles ovoïdes de calcite faiblement magnésienne, bordées d'une frange de cils.

Ce bio-essai est un test de toxicité chronique qui est réalisé en 6j et mis en œuvre selon les indications du manuel standard de Ostracodtoxkit™ F - Chronic " Direct Contact " Toxicity Test for Freshwater Sediments [MicroBioTests Inc., 2004].

L'essai a été réalisé ici sur les sédiments « purs », et n'a donc pas été réalisé sur la base d'une gamme de dilutions des particules collectées à l'issue de la filtration. Par conséquent, on ne peut pas déterminer de valeur de CE<sub>20</sub> pour l'échantillon testé sur la base des critères d'effets suivis. Les résultats seront simplement exprimés en pourcentage d'effets observés pour un essai sur les sédiments « purs ».

| Type d'exposition | Organisme test                                 | Norme/Protocole                                         | Critère d'effet mesuré (durée d'exposition)           | Préparation de l'échantillon                                            |
|-------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Aiguë             | <i>Daphnia magna</i> (Dm)                      | NF EN ISO 6341<br>(T 90-301)                            | Mobilité<br>(24 h et 48 h)                            | Eau brute                                                               |
|                   | <i>Vibrio fischeri</i> (Vf)                    | ISO 11348-3                                             | Luminescence<br>(30 mn)                               | Filtration à 0,45 µm                                                    |
|                   |                                                | Microtox® Basic<br>Solid Phase Test avec I <sub>0</sub> | Luminescence<br>(20 mn)                               | Particules ≥ 1,2 µm                                                     |
| Chronique         | <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i><br>(Ps) | NF T 90-375                                             | Croissance de la population<br>(72 h)                 | Filtration à 1,2 µm                                                     |
|                   | <i>Brachionus calyciflorus</i> (Bc)            | Protocole<br>RoToxkit™ F                                | Croissance de la population<br>(48 h)                 | Eau brute<br>ou filtration à 1,2 µm<br>(2 modes de préparations testés) |
|                   | <i>Ceriodaphnia dubia</i> (Cdu)                | NF T 90-376                                             | Croissance de la population<br>Reproduction<br>(7 j)  | Filtration à 1,2 µm                                                     |
|                   | <i>Daphnia magna</i> (Dm)                      | ISO/FDIS 10706                                          | Croissance de la population<br>Reproduction<br>(21 j) | Eau brute                                                               |
|                   | <i>Heterocypris incongruens</i> (Hi)           | Protocole<br>OstracodToxkit™ F                          | Mortalité<br>Croissance des organismes<br>(6 j)       | Particules ≥ 1,2 µm                                                     |

Tableau 3 Essais d'écotoxicité réalisés sur les échantillons de RUTP des DO de Grézieu et d'Ecully

## 6.2 Résultats des essais d'écotoxicité

### 6.2.1 Pour la fraction « eau » des échantillons de Grézieu

Deux échantillons, issus de deux campagnes de prélèvement, ont été testés. Le premier à été prélevé en février 2007, le second en mai 2009.

Les résultats sont présentés dans la figure 9 ci-dessous. Celle-ci montre que seuls deux bio-essais conduisent à des CE<sub>20</sub> supérieures à 80%. Il s'agit de :

- l'essai de toxicité chronique sur *Ceriodaphnia Dubia* (CDu) (l'essai de reproduction conduit à une CE<sub>20</sub> de 19,59% et celui sur la croissance à une CE<sub>20</sub> de 16,64%),
- et de l'essai de toxicité chronique sur *Brachionus calyciflorus* avec une CE<sub>20</sub> de 12,96%.

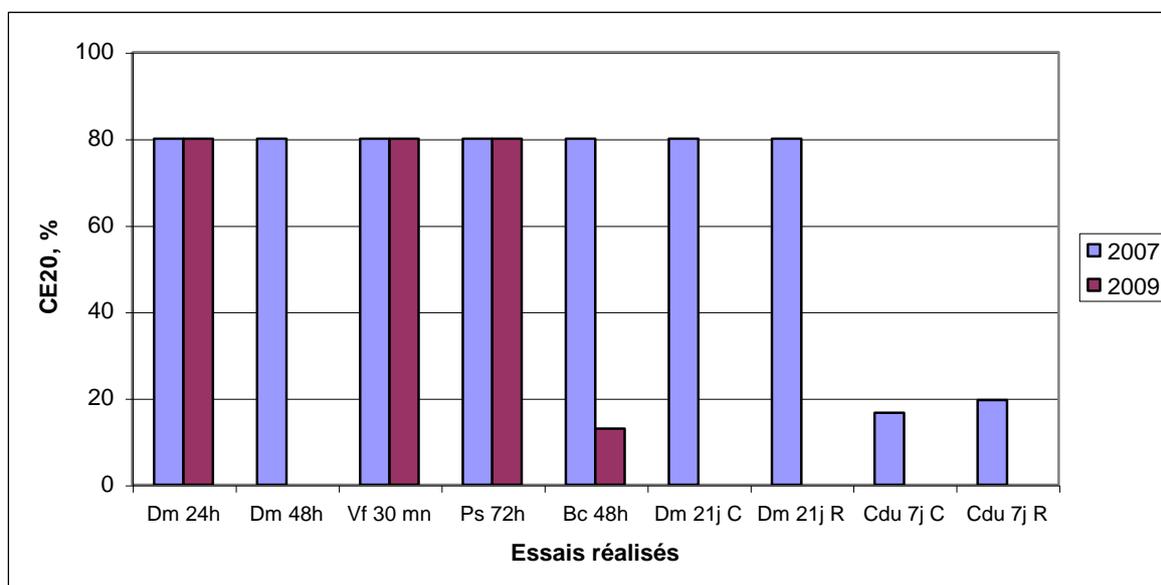


Figure 9 Résultats des essais écotoxicologiques sur la fraction « eau » de Grézieu

L'essai *Brachionus calyciflorus* présenté ci-dessus a été réalisé sur eau brute. En complément, nous avons réalisé le même essai sur l'échantillon de Grézieu filtré à 1,2 µm. Les résultats sont présentés dans la figure 10 ci-dessous.

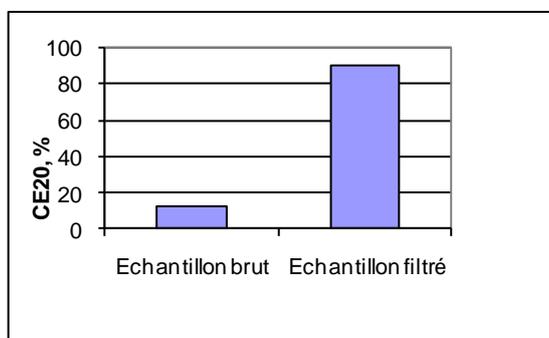


Figure 10 Résultats de l'essai rotifère (*Brachionus calyciflorus*, 48h) sur la fraction « eau » de Grézieu

La figure 10 montre qu'en filtrant l'échantillon, on n'observe plus de toxicité avec l'essai *Brachionus calyciflorus*. Ce résultat contribue à démontrer que la toxicité de cet échantillon est située majoritairement sur la fraction particulaire.

#### 6.2.2 Pour la fraction « particules » des échantillons de Grézieu

##### Écotoxicité de la fraction « particules » vis-à-vis de *Vibrio fischeri*

La Figure 11 présente les valeurs de CE20 obtenues suite à la mise en œuvre de l'essai Microtox® phase solide sur les « particules » de l'échantillon de RUTP prélevé à Grézieu en 2007 et en 2009.

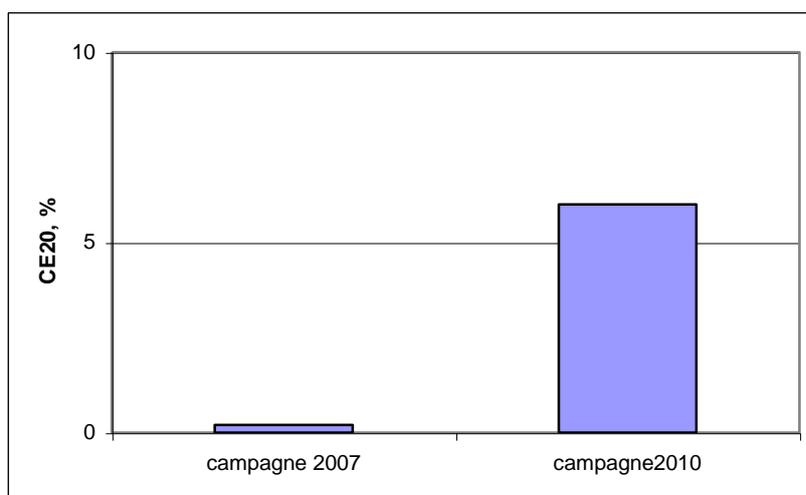


Figure 11 : Résultats des essais *Vibrio Fischeri* -Phase solide sur la fraction « sédiments » de Grézieu

La différence de toxicité entre les deux prélèvements (2007 et 2009) confirme tout d'abord la variabilité des RUTP au cours du temps.

Par ailleurs, avec des valeurs de CE<sub>20</sub> de 0,2% en 2007 et de 6% en 2009, les particules de cet échantillon de RUTP se révèlent très toxiques vis-à-vis de *V. fischeri*.

##### Écotoxicité de la fraction « particules » vis-à-vis de *Heterocypris Incongruus*

L'essai « ostracodes » mis en œuvre sur les « particules » de l'échantillon de RUTP prélevé en 2007, a conduit un taux de mortalité de 100% des organismes mis en contact avec l'échantillon « pur ». En effet, à la fin de la période d'essai, aucun organisme n'a été retrouvé vivant dans les 6 puits contenant les particules de RUTP (soit 60 ostracodes). Ce résultat confirme la toxicité liée aux particules évoquée ci-dessus.

### 6.2.3 Pour la fraction « eau » des échantillons d'Ecully

La fraction « eau » des échantillons d'Ecully (mai 2009) a été testée avec une batterie de quatre bio-essais. Les résultats montrent que l'essai rotifères (Bc) a été sensible à cet effluent. Un essai complémentaire vis-à-vis de cet organisme, réalisé avec le même échantillon, mais après filtration à 1,2 µm n'a montré aucune toxicité. Une fois encore nous pouvons conclure à la localisation de la toxicité dans les particules en suspension.

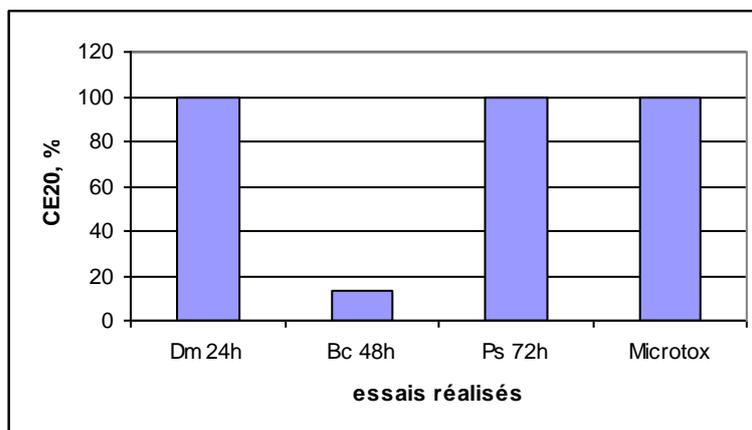


Figure 12 Résultats des bio-essais réalisés sur la fraction « eau » d'Ecully

Notons enfin qu'aucun essai d'écotoxicité n'a pu être réalisé sur la fraction « particules » d'Ecully car les échantillons prélevés présentaient une fraction particulaire trop faible en volume.

## 7. Interprétation des résultats

### 7.1 Analyse des résultats obtenus

#### 7.1.1 Hydrologie et physico-chimie

L'analyse des résultats hydrologiques montre que les échanges entre la colonne d'eau et le substrat sont localisés surtout aux alentours des seuils morphologiques et qu'ils augmentent avec le débit et la pente du cours d'eau. Le temps de séjour d'un soluté dans la zone hyporhéique dépend du débit mais reste le plus souvent situé entre 10 et 100 jours, ce qui implique d'utiliser des bio-essais chroniques pour l'évaluation de la toxicité des RUTP sur les organismes de ce compartiment

Pour les zones de la rivière situées hors seuils morphologiques, les temps de séjour dans le substrat sont encore plus importants. En revanche, pour la colonne d'eau le temps de séjour est beaucoup plus faible : les polluants en solution dans la colonne d'eau mettent de l'ordre de 2 heures pour rejoindre le Rhône.

L'étude physico-chimique menée sur le DO de Grézieu montre que les échantillons de la campagne de 2007 seraient plus toxiques (plus chargés en ammonium et en métaux lourds notamment) que ceux prélevés en 2009.

Concernant les deux stations étudiées, il apparaît que les échantillons prélevés au niveau du DO de Grézieu déversent des flux potentiellement plus toxiques que ceux prélevés au

niveau d'Ecully. Il ne faut toutefois pas tirer de conclusion générale sur le caractère polluant respectif de ces deux déversoirs, compte du très faible nombre d'échantillons analysés.

En ce qui concerne l'ammonium, pour la gamme de pH mesurée pour l'échantillon, on peut conclure qu'il est réparti entre la forme  $\text{NH}_4^+$  et la forme  $\text{NH}_3$ , qui est connue pour être la forme la plus toxique pour les organismes vivants [US EPA, 1999b].

### 7.1.2 Ecotoxicologie

Une batterie d'essais d'écotoxicité « aigus » et « chroniques » et a été mise en place sur les fractions « eau » et « particules ».

Pour la fraction « eau » nous avons noté une toxicité vis-à-vis de *Brachionus calyciflorus* pour les deux DO, et une toxicité vis-à-vis de *Ceriodaphnia dubia* pour le DO de Grézieu (le DO d'Ecully n'a pas été testé avec cet organisme). Nous avons réalisé des essais complémentaires sur l'échantillon filtré de Grézieu vis-à-vis de *B.calyciflorus* et les résultats montrent que l'échantillon filtré est moins toxique que l'échantillon brut.

Tous les autres essais se sont révélés non sensibles à la fraction « eau » des deux DO, bien que des données de la littérature montrent que les essais *D.magna* et *V.fischeri* sont en général sensibles aux effluents écotoxiques. Malgré sa sensibilité, aux métaux lourds notamment, l'essai sur *P. subcapitata* n'a pas non plus révélé d'écotoxicité des échantillons issus des deux DO. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les échantillons testés sont riches en matière organique pouvant agir sur la biodisponibilité des polluants, ainsi qu'à l'effet « engrais » des nutriments qu'ils contiennent pour les micro-algues qui pourrait masquer la toxicité liée aux polluants présents. Pour cet organisme, des mesures plus pertinentes dans ce contexte, telles que le suivi d'activités enzymatiques, par exemple, pourraient être proposées.

Pour la fraction « particules », l'essai Microtox-Phase solide s'est révélé très sensible et nous avons noté des  $\text{CE}_{20}$  atteignant 0,2% et 6%, ce qui correspond à des échantillons très toxiques. Cette toxicité pourrait être liée à la présence de polluants (métaux lourds notamment) adsorbés sur les particules.

Compte tenu de l'ensemble des résultats obtenus, nous pouvons conclure que les RUTP des DO sont potentiellement toxiques pour les organismes des cours d'eau. Nous avons surtout mis en évidence des risques toxiques pour les organismes qui vivent dans les zones benthiques et hyporhéiques, étant donné que la fraction particulaire est en général la plus toxique. Par ailleurs, les temps de séjours des polluants dans la zone hyporhéique, qui peuvent atteindre plusieurs dizaines à plusieurs centaines de jours pour les faibles débits, ont pour conséquence une exposition prolongée des organismes qui y vivent. L'ensemble de ces informations vont dans le sens d'un risque écotoxicologique important pour le compartiment hyporhéique qui correspond par ailleurs à la zone de reproduction de certains organismes et la zone de repli des organismes en période d'étiage.

Cette étude exploratoire reste toutefois à confirmer par des études répétées sur d'autres périodes de prélèvement des DO étudiés, ainsi que sur d'autres DO.

## **7.2 Recommandations : note méthodologique pour la caractérisation de l'écotoxicité des DO**

La caractérisation de l'écotoxicité potentielle des effluents d'un DO pour un cours d'eau donné comprend deux étapes principales :

- La première étape consiste en une étude hydrologique du cours d'eau concerné. Des mesures de terrain, couplées à un certain nombre de calculs, permettront d'évaluer le temps de séjour des RUTP dans la colonne d'eau et dans la zone hyporhéique. L'étude hydrologique comportera une phase géomorphologique par détermination de la topographie du cours d'eau, la granulométrie et la succession des faciès géomorphologiques. La deuxième phase inclut des mesures hydrologiques telles que la conductivité hydraulique, le gradient hydraulique, le débit et la ligne d'eau. La modélisation et les calculs aboutiront à une estimation des temps de séjour et des vitesses d'écoulement dans la zone hyporhéique. Ces données permettront de choisir parmi les tests écotoxicologiques ceux dont la durée est compatible avec le temps de séjour des effluents dans le(s) compartiment(s) cible(s) du cours d'eau concerné.
- La deuxième étape correspond à l'analyse physico-chimique et écotoxicologique des échantillons prélevés.

⇒ Pour la réalisation des prélèvements, la solution la plus adaptée consiste à installer un préleveur automatique qui se déclenche dès le début du déversement dans le cours d'eau. Dans le cas contraire, il faudra s'organiser pour prélever manuellement les eaux qui s'écoulent au début de l'orage. Nous recommandons un prélèvement minimum de 30 litres dans des flacons de 500 ml qui doivent être congelés immédiatement. Ce grand volume prélevé est nécessaire pour obtenir un volume de particules issues de la filtration suffisant pour réaliser les analyses physico-chimiques et les essais d'écotoxicité. La décongélation des échantillons doit commencer la veille des analyses. Une fois décongelés, les échantillons sont filtrés à 1,2 µm pour séparer les fractions « eau » et « particules ». Cette filtration peut être précédée d'une centrifugation à 9000 tours/minute pour faciliter l'opération.

⇒ Les analyses physico-chimiques doivent comporter au minimum l'analyse du pH, de l'ammonium, des phosphates, des nitrates, de l'oxygène dissous, de la perte au feu et des métaux lourds. Ces analyses permettront de mieux connaître la composition du milieu et d'interpréter par la suite les essais d'écotoxicité.

⇒ Des essais d'écotoxicité doivent être réalisés sur les différentes fractions des échantillons des DO :

**Sur les échantillons filtrés**, il est tout d'abord proposé l'utilisation du test *Ceriodaphnia dubia* (Cdu) puisque cet essai chronique a démontré sa sensibilité pour la détermination de l'écotoxicité des échantillons filtrés des DO. Nous recommandons également la réalisation de l'essai sur *B.calyciflorus* sur ces mêmes échantillons filtrés.

**Sur les échantillons bruts** (non filtrés), nous recommandons la mise en œuvre du test *B.calyciflorus*, mais uniquement si l'effluent est peu chargé en particules. Cette approche permet d'éviter de tester des effluents très chargés avec cet organisme qui le supporte mal, tout en disposant d'informations sur la toxicité de la fraction particulaire des effluents ne générant pas suffisamment de particules pour qu'elles puissent être testées à part.

**Sur la fraction particulaire** des RUTP (quand elle est présente en quantité suffisante) il est proposé l'utilisation de deux essais complémentaires : l'essai « Microtox-Phase solide » ( $Vf_{\text{Phase solide}}$ ) et l'essai « ostracodes » (Hi). Par ailleurs, si cela est possible techniquement et financièrement, nous recommandons la réalisation de l'essai ostracodes sur une large gamme de dilutions, comme pour les autres bio-essais.

Enfin, **d'autres essais écotoxicologiques** peuvent être proposés en complément, sur la base des résultats de la littérature et de l'expérience de nos laboratoires dans le domaine. Nous recommandons notamment l'essai sur *Daphnia magna* (Dm) qui offre l'avantage de pouvoir travailler sur les eaux brutes, ainsi que l'essai algues (Ps) qui a l'avantage d'être sensible aux métaux lourds notamment.

Le logigramme ci-après résume les actions à mener pour la caractérisation de l'écotoxicité des rejets d'un DO

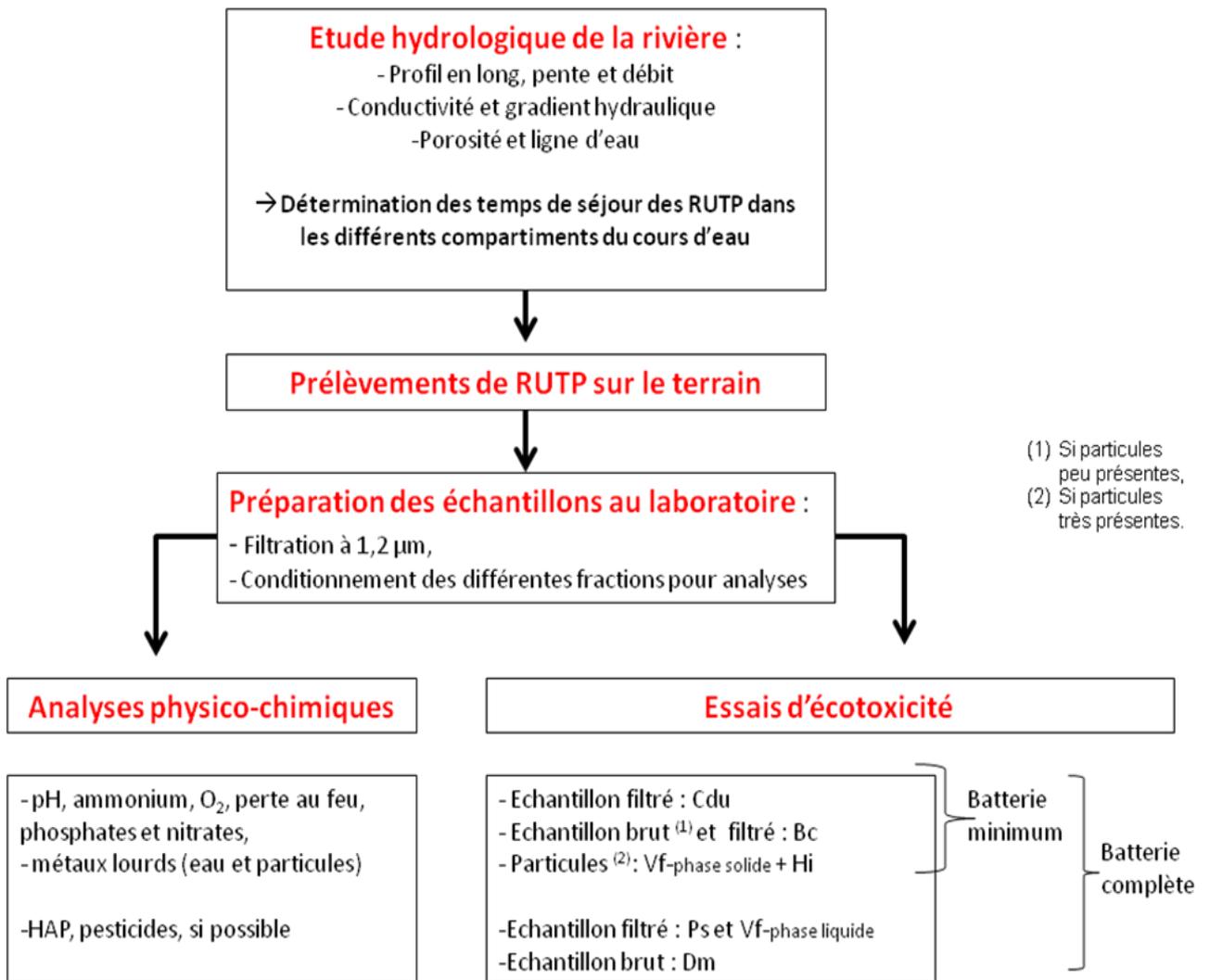


Figure 13 : Logigramme des actions à mener pour la caractérisation de l'écotoxicité d'un DO

### **7.3. Intérêt des conclusions de l'étude pour la gestion des rejets des DO**

La note méthodologique établie ci-dessus, portant sur la caractérisation de l'écotoxicité des effluents d'un DO (étude hydrologique, physico-chimique et écotoxicologique) peut être utilisées par les gestionnaires pour :

- calculer un indice de risque écotoxicologique pour le cours d'eau (IR), sur la base duquel ils pourront déclencher des actions correctives pour diminuer les risques liés aux déversements des DO dans les petits cours d'eau (contrôle *a priori*),
- comparer la qualité d'un effluent, avant et après mise en place d'un traitement (décantation, par exemple), ou de toute autre action corrective, et ainsi vérifier son efficacité (contrôle *a posteriori*).

### **7.4. Limites de l'étude exploratoire effectuée et perspectives**

Les travaux exploratoires effectués ici ont montré l'intérêt et la pertinence de l'utilisation des essais d'écotoxicité pour la gestion des rejets des déversoirs d'orage. Ce travail a toutefois été réalisé sur un nombre extrêmement limité d'ouvrages et d'échantillons. Les résultats et préconisations sont donc maintenant à consolider par la mise en œuvre de ces bio-essais sur une plus large gamme de situations : types d'ouvrage, types de cours d'eau et périodes de prélèvement.

Par ailleurs, deux points au moins mériteront d'être mieux pris en compte à l'avenir dans la note méthodologique :

- la période d'échantillonnage des RUTP à retenir en fonction de la nature du bassin versant collecté,
- la toxicité relative des différentes fractions particulières des RUTP (fines, particules grossières,...) dont le devenir n'est pas forcément le même dans le cours d'eau.

## ***BIBLIOGRAPHIE***

- Angerville R., 2009, Evaluation des risques écotoxicologiques liés au déversement de Rejets Urbains par Temps de Pluie (RUTP) dans les cours d'eau : application à une ville française et à une ville haïtienne. Thèse de doctorat, ENTPE/INSA de Lyon, 18 mai 2009, 425p.
- Bernoud S., 1998, Réponse écologique d'un ruisseau périurbain aux rejets de temps de pluie. Rapport de stage de Mastère. Spécialité : Eau Potable et Assainissement. Strasbourg : Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 46p
- Chocat B., Cathelain M., Mares A. et Mouchel J. M., 1993, La pollution due aux rejets urbains de temps de pluie : impacts sur les milieux récepteurs. Exposé introductif. « La pluie, source de vie, choc de pollution ». 146ème session du comité technique de la S. H. F. Paris, France, 17 et 18 mars 1993. La Houille Blanche, n° 1/2, pp. 97-105
- Gnouma R., 2006, Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron. Thèse. Génie Civil - ED MEGA Villeurbanne, Lyon : INSA de Lyon et CEMAGREF de Lyon, 413p.
- INERIS, 2003c, Inhibition de la croissance de la population de *Ceriodaphnia dubia*: Influence de la modification du protocole expérimental sur la validité des essais. Rapport technique. Paris: INERIS. Unité d'évaluation des risques écotoxicologique. 9p.
- Mulliss R. M., Revitt D. M. et Shutes R. B. E., 1997, The impacts of discharges from two combined sewer overflows on the water quality of an urban watercourse. Water Science and Technology, Vol. 36, n° 8/9, pp. 195-199.
- MicroBioTests Inc., 2004, OSTRACODTOXKIT F™ - Chronic "direct contact" Toxicity Test for Freshwater Sediments - Standard Operational Procedure. MicroBioTests Inc. 28p.
- NF EN ISO 11348-3, 1999, Qualité de l'eau - Détermination de l'effet inhibiteur d'échantillons d'eau sur la luminescence de *Vibrio fischeri* (Essai de bactéries luminescentes) - Partie 3 : Méthode utilisant des bactéries lyophilisées. AFNOR. 21p.
- NF T 90-376, 2000, Qualité de l'eau - Détermination de la toxicité chronique vis-à-vis de *Ceriodaphnia dubia* en sept jours - Essai d'inhibition de la croissance de la population. AFNOR. 18p.
- NF EN ISO 6341 (T 90-301), 1996, Qualité de l'eau - Détermination de l'inhibition de la mobilité de *Daphnia magna* Strauss (*Cladocera*, *Crustacea*) - Essai de toxicité aiguë. AFNOR. 14p.
- NF T 90-376, 2000, Qualité de l'eau - Détermination de la toxicité chronique vis-à-vis de *Ceriodaphnia dubia* en sept jours - Essai d'inhibition de la croissance de la population. AFNOR. 18p.
- NF T 90-375, 1998, Qualité de l'eau - Détermination de la toxicité chronique des eaux par l'inhibition de la croissance de l'algue d'eau douce *Pseudokirchneriella subcapitata* (*Selenastrum capricornutum*). AFNOR. 13p.
- Nygaard G., Komarek J., Kristiansen J. et Skulberg O. L., 1986, Taxonomic designations of the bioassay algal NIVA-CHL1 (*Selenastrum capricornutum*) and some related strains. Opera Botanica, Vol. 90, pp. 1-46
- Orczyk C., 2001, Etude du devenir de la matière organique apportée par les rejets urbains de temps de pluie dans un ruisseau périurbain : développement d'une démarche méthodologique et application à la Chaudanne. Rapport de stage. Lyon, Lille : CEMAGREF de Lyon Faculté Libre des Sciences de Lille, 81p.

Santiago S., Becker van Slooten K., Chèvre N., Pardos M., Benninghoff C., Dumas M., Thybaud E. et Garrivier F., 2002, Guide pour l'utilisation des tests écotoxicologiques, avec les daphnies, les bactéries luminescentes et les algues vertes, appliqués aux échantillons de l'environnement. Soluval Santiago. Suisse: Soluval Santiago, Institut F.-A. Forel (Université de Genève), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 55p.

US EPA, 1978, The *Selenastrum capricornutum* Printz alga assay bottle test. United States Environmental Protection Agency. Corvallis (Oregon), Rep. EPA/600/9-78/018

US EPA, 1999b, 1999 Update of ambient water quality criteria for ammonia. United States Environmental Protection Agency. EPA-822-R-99-014. Office of Water. Washington, DC147p.

Vivier A., 2006, Caractérisation hydrogéophysique d'un dépôt fluvioglaciaire - Evaluation de l'effet de l'hétérogénéité hydrodynamique sur les écoulements en zone non-saturée. Thèse. ED MSII. Discipline:Sciences pour l'Ingénieur Strasbourg : Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 293p.

## ANNEXE 1

### Détail de la partie hydraulique

#### Etat de l'art

L'étude des circulations d'eau dans le substrat des cours d'eau est abordée depuis une dizaine d'années à l'aide d'outils de modélisation hydraulique (Storey *et al.* 2003 ; Sawyer 2009 ; Kasahara & Hill 2006 ). L'existence de la zone d'échange ou zone hyporhéique encore appelée « transient storage zone » dans la littérature anglo-saxonne n'est plus à démontrer. C'est en particulier son rôle de réacteur biogéochimique qui a conduit à s'intéresser à sa dynamique (Jones & Holmes 1996 ; Fisher *et al.* 1999). Dans le cas de la matière organique notamment – dont la rétention est essentielle au maintien des populations interstitielles – on peut souligner le rôle des structures filtrantes. Les zones de rétention se situent principalement à l'interface entre deux milieux contrastés; leur biodiversité est plus importante que celle des milieux adjacents et leur efficacité en terme d'autoépuration est très importante (Vervier *et al.* 1992).

Gibert (1990) définit quatre grands types de structures filtrantes dont les interactions sont très fortes :

- des filtres mécaniques qui retiennent la fraction particulaire ;
- des filtres physiques qui retiennent la fraction dissoute par adsorption ;
- des filtres chimiques par des réactions d'oxydoréduction ;
- des filtres biochimiques où la matière organique est dégradée et métabolisée par la faune.

L'effet épurateur des seuls filtres mécaniques et physiques n'est qu'apparent puisqu'ils permettent le stockage de la matière organique et non sa dégradation. Néanmoins, ils sont un préalable important à cette dégradation puisqu'ils favorisent son immobilisation et sa disponibilité dans des zones où des réactions chimiques et une biomasse importante peuvent se développer. Les obstacles (embâcles, blocs, rochers...) ou le lit majeur (zone de dépôt durant les inondations) peuvent constituer de telles structures filtrantes, mais la plus importante d'entre elles reste sans doute la zone hyporhéique (Datry *et al.* 2008).

Les facteurs qui influencent l'autoépuration en rivière sont principalement le débit et la vitesse du courant (dont l'augmentation aurait plutôt tendance à favoriser l'élimination de la matière organique), la température (bien qu'il semblerait qu'elle ne joue un rôle significatif que pour des valeurs extrêmes), la concentration en oxygène (dont le déficit peut être un facteur limitant à la métabolisation de la matière organique), ou encore la géomorphologie (qui conditionne notamment le temps de transit et l'oxygénation dans la colonne d'eau). La dilution n'est pas en elle-même un mécanisme d'épuration, elle permet seulement de réduire les effets polluants sur l'hydrosystème pendant la période d'assimilation en abaissant les concentrations sous leurs seuils de toxicité. Il reste néanmoins les effets chroniques liés à la bio-accumulation dans les tissus vivants.

La modélisation hydraulique des flux d'eau et de substances associées requiert une description très détaillée des propriétés hydrodynamiques du substrat et des berges ainsi qu'une bonne représentation de la dynamique temporelle et spatiale des charges hydrauliques qui conditionnent les directions, sens et intensités des flux hyporhéiques.

La définition d'un temps de transit moyen fait débat (Haggerty *et al.* 2002 ; Tonina & Buffington 2007 ; Sawyer 2009 ) car les flux hyporhéiques sont multi-échelles avec des trajets longs

plus profonds et des trajets courts superficiels qui peuvent se répéter sur une distance donnée. Les expériences développées par Tonina & Buffington (2007) en laboratoire hydraulique montrent que la pénétration d'un soluté dans une succession de faciès se produit en deux temps : un temps court variant de 40 à 100 minutes pendant lequel les formes convexes du lit sont envahies par du soluté. Les durées courtes à longues correspondent à des débits forts à faible combinées à un relief accentué à émoussé du lit. L'imprégnation des autres formes comme les plats et les mouilles se fait plus lentement. Elle représente moins de 1/6 du flux hyporhéique total au bout de 400 minutes d'expérimentation. L'expérience est menée avec une pente de 0.4%, une conductivité hydraulique moyenne ( $K$ ) de 0.05m/s et une granulométrie comprise entre 2 et 20 mm pour un diamètre médian de 10 mm. On peut donc concevoir que dans le cas d'un rejet polluant temporaire comme celui d'un rejet urbain de temps de pluie, ce sont essentiellement les formes convexes (les reliefs) du lit qui seront traversées par les polluants.

En milieu naturel, la vitesse d'écoulement dans les berges est de quelques centimètres par jour contre quelques mètres dans le substrat poreux du lit selon sa nature. Cela tient à l'hydromorphogénèse de la plaine d'inondation où en raison des faibles vitesses d'écoulement, seul les particules fines arrivent et sédimentent. D'anciens chenaux d'écoulement abandonnés lors de drues majeures ou progressivement comblés peuvent néanmoins maintenir des circulations hyporhéiques mais ce cas implique une vallée assez large.

Des travaux expérimentaux ont été menés sur la vitesse des matières en suspensions ainsi que sur celle des colloïdes en suspension dans les milieux poreux, ceci pour étudier la propagation des polluants (Kretzschmar *et al.* 1997 ; Benamar *et al.* 2005). Les particules utilisées vont de 2 à 50 micro-mètres circulant dans un substrat dont les grains varient de 1.15 à 3.15 mm classé comme gravier moyen (cf. tableau 1). La porosité totale mesurée des milieux expérimentaux est de l'ordre de 40%. La conductivité hydraulique mesurée à 2.3 E-2 m/s. Le taux de restitution des particules passe de 7% à 75% selon que la vitesse moyenne d'écoulement dans les pores elle varie de 2 à 86 m/jour. Un résultat notable dans les deux expérimentations est que les particules les plus grossières ont une vitesse réelle supérieure à 10% de celle d'un soluté (ou traceur en solution dans ce cas) dès lors que la vitesse réelle moyenne dépasse 11 m/jour. Ce résultat est interprété comme la plus grande probabilité que ces particules soient prises dans les tubes de courant les plus rapides au sein des pores du milieu. Ceci montre que les particules les plus grosses peuvent se déplacer plus vite que la pollution dissoute dans un milieu poreux.

Le tableau suivant donne une idée des distances que l'eau peut parcourir dans un substrat homogène de cours d'eau sous une pente hydraulique  $i$  de 1%. C'est l'ordre de grandeur des pentes locales rencontrées dans les petits cours d'eau étudiés. Le temps de séjours de l'eau hyporhéique dépend de la longueur du faciès convexe traversé. Les données de terrain de cette étude donnent une moyenne 5 mètres environ. La dernière colonne du tableau permet de constater la grande amplitude du temps de transit selon la nature du matériau en place. Il est à noter que la conductivité hydraulique ( $K$ ) exprime une vitesse moyenne d'écoulement fictive dans toute la section considérée et pour un gradient hydraulique unitaire (soit 1 m de hauteur d'eau par mètre de milieu traversé), ce qui est très rarement le cas dans la nature.

| Nature du sédiment | Diamètre moyen (mm) | Porosité efficace (%) | Conductivité hydraulique (K en m/s) | Distance (m) parcourue en 1 jour pour $i = 1\%$ | Temps de transit (heure) dans un seuil de 5 m |
|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Gravier moyen      | 2.5                 | 40                    | 3.00E-01                            | 648.000                                         | 0.19 heure                                    |
| Sable grossier     | 0.25                | 34                    | 2.00E-03                            | 5.082                                           | 24 heure                                      |
| Sable moyen        | 0.125               | 30                    | 6.00E-04                            | 1.728                                           | 70 heure                                      |
| Sable fin          | 0.09                | 28                    | 7.00E-05                            | 0.216                                           | 3 jours                                       |
| Sable très fin     | 0.045               | 24                    | 2.00E-05                            | 0.072                                           | 70 jours                                      |
| Sable silteux      | 0.005               | 5                     | 1.00E-09                            | 0.000                                           | 792 années                                    |

Tableau 1 : Relation porosité efficace- vitesse d'écoulement. Modifié de l'U.S. Geological Survey.

Dans la réalité de terrain, l'homogénéité granulométrique peut exister par endroit ou plus précisément par faciès hydro-morphologique du fait d'un grano-classement naturel visible en surface. La question est d'en connaître la continuité verticale qui influence et la distance et le temps de parcours des flux hyporhéiques. Dans le cadre des sites étudiés, il a été procédé à des slug-tests pour déterminer l'évolution de K. Le protocole est décrit dans la partie matériel et méthode.

Dans le cas qui nous intéresse de l'arrivée d'un polluant, trois configurations de débit sont à considérer.

-Le cours d'eau est en débit fort. La micro- et la méso- topographie du lit sont dites noyées et n'influencent plus la forme de la ligne d'eau de surface qui se confond avec la pente moyenne du lit. Les échanges entre la colonne d'eau et le substrat sont limités. Les échanges sont à ce moment liés aux macro- formes du type méandre et aux gradients hydrauliques latéraux entre la nappe et le cours d'eau. Selon la hauteur de la nappe d'accompagnement, qui par définition est très liée à celle du cours d'eau, les échanges verticaux sont contrariés et même inversés après une crue débordante avec une exfiltration dominante du substrat vers le cours d'eau. Il s'agit d'échanges « lents » du fait des conductivités hydrauliques faibles des berges par contraste avec les conductivités mesurées dans le substrat poreux du lit. Dans cette configuration, le rejets polluant est pour l'essentiel transporté et dilué. Son impact potentiel n'est pas localisé dans le secteur du rejet.

-Le cours d'eau présence un écoulement faible à moyen. Le polluant est accompagné d'une augmentation de débit temporaire, de l'ordre de l'heure, qui favorise les transferts de substance depuis la colonne d'eau vers la matrice poreuse. Dans ce cas ce sont les seuils, les rapides et les bancs de graviers qui vont être traversés en premier.

-Le cours d'eau est à sec. Dans ce cas le rejet polluant s'infiltré dans la matrice poreuse qu'il imprègne. Le temps de contact va dépendre de la reprise d'un écoulement en surface. Il peut y avoir transport si un écoulement hyporhéique persiste mais il s'agit alors d'un trajet long difficile à estimer. L'impact est totalement localisé.

Dans ce travail nous considérons la situation intermédiaire qui domine dans le temps et permet un premier calcul des temps de contact.

## **Matériels et méthodes**

### ***Description des sites étudiés***

Deux sites expérimentaux de l'OTHU ont été retenus dans le cadre de cette étude.

- Celui de la Chaudanne à Grézieu la Varenne est organisé autour d'un déversoir de réseau unitaire sur un petit cours d'eau non pérenne. L'objectif est de mesurer l'effet des rejets urbains de temps de pluie sur la qualité biologique et chimique du cours d'eau qui est pour l'essentiel située dans le substrat. Des mesures de débit sont disponibles sur le rejets et dans le cours d'eau lui-même. L'environnement du ruisseau est encore à dominante rurale avec un bassin versant amont de 238 ha dont 16 ha font l'objet d'un drainage urbain (soit 6.7%). Le ruisseau développe ainsi une géomorphologie naturelle tant au niveau de l'alternance des faciès que de la granulométrie. Le ruisseau présente par endroit des sapements de berge, des élargissement et des incisions situées en proximité aval des points de rejets de temps de pluie.

- Le deuxième site concerne le ruisseau des Planches à Ecully. Il a été retenu en raison de l'existence ici aussi d'un déversoir de réseau unitaire sur un petit cours d'eau. On observe des perturbations géomorphologiques locales comme une fosse de dissipation de 8m de large juste à l'aval du déversoir. Ce bassin versant a une superficie de 245 ha, une urbanisation résidentielle moyennement dense avec un coefficient d'imperméabilisation de 42 %. Il est drainé par un réseau d'assainissement majoritairement unitaire équipé de 5 petits déversoirs d'orage situés sur petit un affluent et d'un déversoir d'orage principal, dit déversoir Valvert, qui rejette par temps de pluie dans le ruisseau des Planches. Les mesures de quantité et de qualité d'eau réalisées par l'OTHU ne concernent que le réseau unitaire. Il n'existe pas de données de débit ni de qualité dans ce cours d'eau.

### ***Topographie des sites d'étude***

Les campagnes topographiques ont été réalisées en septembre 2009. Nous sommes à cette époque en condition de reprise des débits après l'étiage estival. Les relevés ont été concentrés sur chaque site autour d'une séquence plat courant-seuil-mouille afin d'établir les caractéristiques géométriques propices aux échanges hyporhéiques.

### ***Physico-chimie de la zone hyporhéique***

L'eau de la zone hyporhéique a été échantillonnée à l'aide d'une pompe « Bou et Rouch » utilisée par les biologistes pour prélever la faune interstitielle. Le principe consiste à enfoncer dans le substrat un piézomètre métallique à l'aide d'une masse. La profondeur d'échantillonnage a été choisie à 30 cm dans le substrat. La hauteur de la crépine étant de 15 cm, la zone prélevée est située entre 23 et 37 cm dans le substrat. L'eau hyporhéique est pompée à l'aide d'une pompe à main fixée en tête du piézomètre. On estime que pour 5 litres d'eau prélevée, la zone prospectée représente un cylindre de 0.5 m de rayon sur 15 cm de hauteur, située autour de la crépine. Les caractéristiques physico-chimiques ont été mesurées dès leur prélèvement sur le site afin d'éviter toute évolution. Les mesures ont été réalisées à l'aide de sondes multiparamètres. On été retenus : l'oxygène dissout qui est un marqueur des échanges d'eau entre la surface, riche en oxygène, et le substrat, normalement pauvre en oxygène, mais aussi un témoin d'activité biologique lorsqu'il est consommé. La température qui peut être un indicateur de mélange. La conductivité électrique qui informe sur le temps de contact de l'eau avec la matrice poreuse ou peut indiquer origine différente. Le potentiel redox qui complète l'information de l'oxygène dissout quand celui est

proche de zéro. Le pH dont les variations locales peuvent indiquer des réactions des formes de l'azote (nitrate, ammonium).

### **Principe du Slug-test**

La mesure de  $K$  est réalisée par la méthode du « slug test » ou "essai d'Injection-Relaxation". Il consiste à injecter instantanément de l'eau, à débit constant pendant un temps déterminé, dans le piézomètre et à mesurer l'abaissement du niveau d'eau libre en fonction du temps. La conductivité hydraulique est estimée selon la méthode simplifiée de Hvorslev (1951). La forme générale de l'équation de Hvorslev est :

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L}{R}\right)}{2 L T_i} \quad \text{Eq.1}$$

Avec :  $K$  est la conductivité hydraulique du terrain testé, [m/s] ;  $r$  est le rayon intérieur du puits, [m] ;  $L$  est la longueur de la zone crépinée, [m] ;  $R$  est le rayon intérieur du forage du puits, [m] ;  $T_i$  le temps quand  $h(t)/h_0 = 0,37$

Dans Eq.1,  $T_i$  représente le rapport  $h(t)/h_0$  avec  $h(t)$  la charge hydraulique variable en temps et  $h_0$  la charge hydraulique immédiatement après l'injection de l'eau. Dans notre cas l'essai étant réalisé en milieu saturé en eau, l'atteinte d'un niveau stable à l'aide d'un débit constant n'a pas été recherché. Le protocole a consisté à remplir complètement le tube d'eau en maintenant le débordement pendant plusieurs secondes afin d'établir un régime d'infiltration stabilisé puis à laisser le tube se vider. Le temps de vidange jusqu'à l'équilibre avec la pression hydrostatique du substrat peut varier de quelques secondes à quelques minutes selon la conductivité hydraulique du substrat. La baisse de niveau est donc enregistrée à l'aide d'un capteur de pression autonome introduit dans le tube sous le niveau de la crépine. Il s'agit de sonde « micro Diver » dont le pas de temps d'acquisition minimum est de 0.5 secondes. L'intérêt de ces capteurs est à la fois leur faible encombrement (8cm de long par 1.8cm de diamètre) et le stockage dynamique des données qui n'intervient que lors des variations supérieures à 10 mm entre deux pas de temps successifs. Les essais sont répétés au minimum 3 fois pour prendre en compte un phénomène de décolmatage de la crépine ou de refoulement de substrat qui peut boucher la crépine lors de l'enfoncement. Pour limiter ce phénomène, un tube pvc est introduit dans le piézomètre métallique avant l'opération d'enfoncement. Il est ensuite retiré avec précaution pour ne pas créer d'aspiration. Le « mini Diver » est alors introduit dans le piézomètre. Le dispositif de mesure est décrit en annexe 2. Cinq piézomètres et 5 sondes ont été utilisées en routine pour permettre la réalisation de plusieurs essais en séquence et laisser le temps nécessaire à la descente complète du niveau d'eau dans les piézomètres. Quand cela était possible il a été utilisé un seau à bec pour remplir les piézomètres. Dans certains cas cependant, le recours à un entonnoir s'est avéré nécessaire pour remplir le piézomètre plus rapidement qu'il ne se vidait. Cela implique lors de l'exploitation des données de ne pas considérer la partie de la descente d'eau dans l'entonnoir dont la forme influence la vitesse de vidange. Les mesures ont été réalisées tous les 5 mètres dans le point bas du chenal afin de ne pas biaiser la représentativité spatiale des mesures. Par ailleurs, cette distance a été choisie de manière à ne pas rater de convexité ou concavité dont la longueur moyenne est de cet ordre.

### **Gradient Hydraulique**

Il s'agit ici de mesurer le gradient hydraulique lié à la pression hydrostatique ou niveau de l'eau en surface. En toute rigueur il faudrait mesurer la pression d'eau à la surface du substrat mais la

technique est coûteuse. Les travaux de Tonina & Buffington (2007) montrent que la mesure de la pression hydrostatique reste une bonne approximation. Les mesures sont réalisées autour d'une séquence plat-seuil-mouille. Des enregistrements en continu de la ligne d'eau ont été réalisés sur la Chaudanne, ceci compte tenu d'un environnement expérimental organisé (OTHU). Pour le ruisseau des Planches, quatre piézomètres équipés d'une mesure en continu ont été implantés dans le substrat à moins 30 cm de profondeur (Fig 1).

### **Calcul de la vitesse d'écoulement en milieu poreux**

Elle est liée à la porosité du milieu, à la connectivité entre les pores, à la viscosité cinématique du fluide, à la distance traversée et à la différence de charge hydraulique appliquée. Pour un milieu poreux et uniforme elle est donnée par la loi de Darcy.

$$q = k * \frac{H_A - H_B}{L} = ki \quad \text{Eq 2}$$

Où :

*q* représente le débit spécifique ou débit par unité de surface (m/s)

*k* la conductivité hydraulique (m/s)

*H<sub>A</sub>-H<sub>B</sub>* la différence de charge hydraulique (m)

*L* la distance parcourue par l'eau entre A et B (m)

*i* est appelé gradient hydraulique

Le débit spécifique *q* à la dimension d'une vitesse et représente la vitesse moyenne de l'écoulement dans l'unité de section. La vitesse d'écoulement réelle (*v*) peut alors être approchée connaissant la porosité efficace (*e*) du milieu. Il suffit de diviser le débit spécifique par cette porosité.

### **Résultats**

-Pour le ruisseau des Planches à Ecully, le profil topographique est situé en aval du déversoir d'orage. La pente moyenne est de 1.8% avec des pentes locales de 5 à 7% en aval des deux seuils naturels de ce profil. La matrice grossière est plus développée que sur la Chaudanne avec des galets et blocs pluri-centimétriques. La largeur moyenne du cours d'eau est d'environ 4 m (profils en travers fournis en annexe).

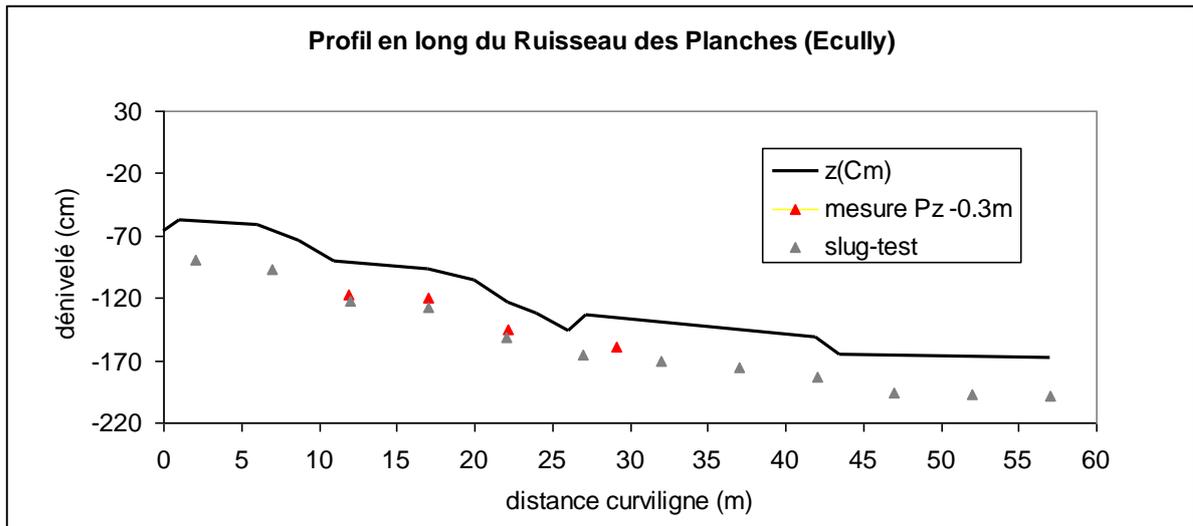


Figure 1 : profil en long d'un bief du ruisseau des Planches (Ecully, 69)

Le début du profil démarre 31 mètres en aval du déversoir. Cette distance correspond à une fosse d'érosion qui reçoit le ruisseau en sortie d'un ouvrage bétonné et le déversoir d'orage. Cette fosse peut jouer un rôle tampon. Nous avons cependant noté les odeurs nauséabondes qui se dégagent de l'eau courante pendant les mesures de terrain et qui indiquent que la pollution transite. Le début du profil correspond donc à la sortie de cette fosse.

-Dans le cas de la Chaudanne, le site est situé 148 mètres en aval du déversoir. Dans la zone d'étude la largeur varie entre 1 et 2 m. La matrice poreuse est dominée par des sables, une fraction graveleuse puis des blocs et galets hérités de la mobilisation de colluvions. La pente moyenne du tronçon qui contient cette séquence est de 1.1% avec des pentes locales de seuils de l'ordre de 4.1%.

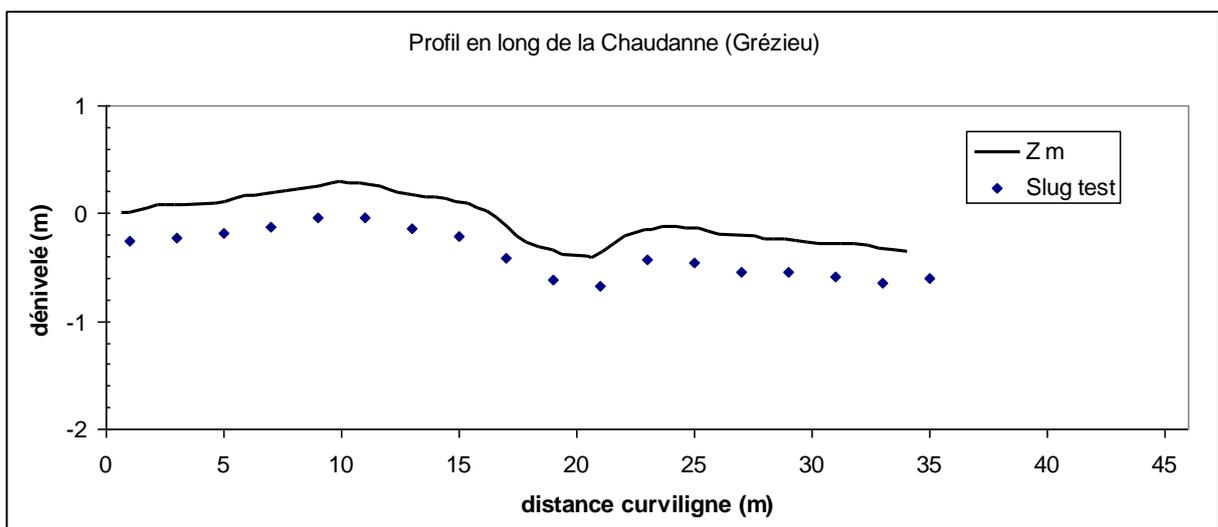


Figure 2 : profil en long d'un bief du ruisseau de la Chaudanne (Grézieu, 69)

Des mesures de conductivité hydraulique (K) du substrat ont été réalisées tous les 5 mètres en utilisant la méthode du slug-tests. Les points testés sont reportés sur les figures 1 et 2. Les chroniques de pression d'eau enregistrées pendant les slug-tests ont été exploitées sous un tableur. Les séquences de « palier-descente » réalisées lors des différents essais ont été isolées

afin d'appliquer la formule de l'Eq.1 et d'évaluer la conductivité hydraulique (K). La fig.3 illustre le résultat de 3 essais réalisés sur un piézomètres. L'amplitude de la vidange est normalisée à 1. Le temps est exprimé en secondes.

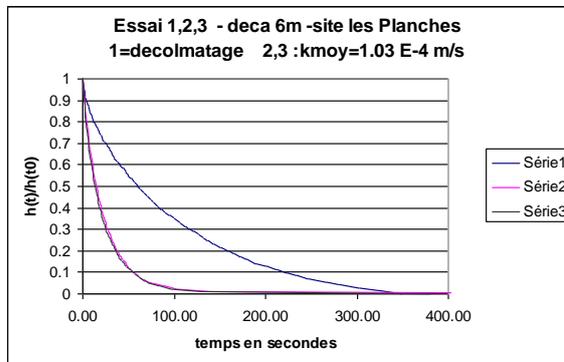


Figure 3 : exemple d'exploitation d'un slug-test.

On discerne nettement que lors du premier essai (essai 1) la descente est moins rapide que pour les 2 essais suivants qui se confondent. Cela traduit le fait que la première injection a servi à dé-colmater la crépine. Nous avons donc retenu la valeur médiane de trois essais au minimum pour caractériser la valeur K du milieu tous les 5 mètres.

Les résultats des slug-tests sont synthétisés sur les profils en long dans les fig. 4 et 5. Les mesures sont répétées en général 3 fois en chaque point. Les valeurs basses correspondent au décolmatage du piézomètre. Une faible dispersion des points confirme la robustesse de la valeur trouvée. La ligne continue entre les valeurs symbolise la valeur médiane de chaque groupe de mesures.

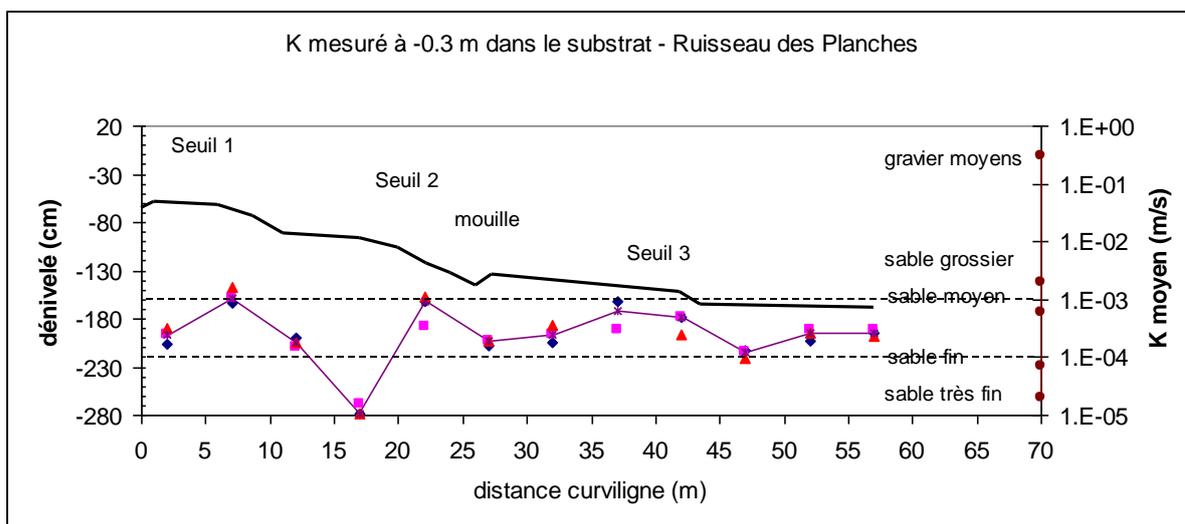


Fig 4 : Valeurs des conductivités hydrauliques mesurées le long du bief du ruisseau des Planches.

On note d'une manière générale que la valeur de K augmente au niveau des seuils pour tendre vers  $1 \text{ E}3 \text{ m/s}$ . Ces valeurs de K sont représentatives des sables moyens pour les seuils et de sables fins pour les plats et les mouilles où K tend vers  $1 \text{ E-4 m/s}$ . Le plat situé à l'amont du seuil 2 présente une valeur de K faible ( $1 \text{ E-5}$ ), représentative des sables très fins. Cette valeur est confirmée par les essais successifs.

Pour le site de la Chaudanne on note des valeurs de conductivité hydraulique comprises entre  $1 \text{ E-3 m/s}$  et  $1 \text{ E-2 m/s}$ , avec des baisses locales à  $1 \text{ E-4 m/s}$ . Ces baisses sont mesurées en sortie des seuils au niveau des abscisses curvilignes 17 à 19 m et 25 m. Ces baisses sont aussi observées en sortie des seuils 1, 2 et 3 du ruisseau des Planches.

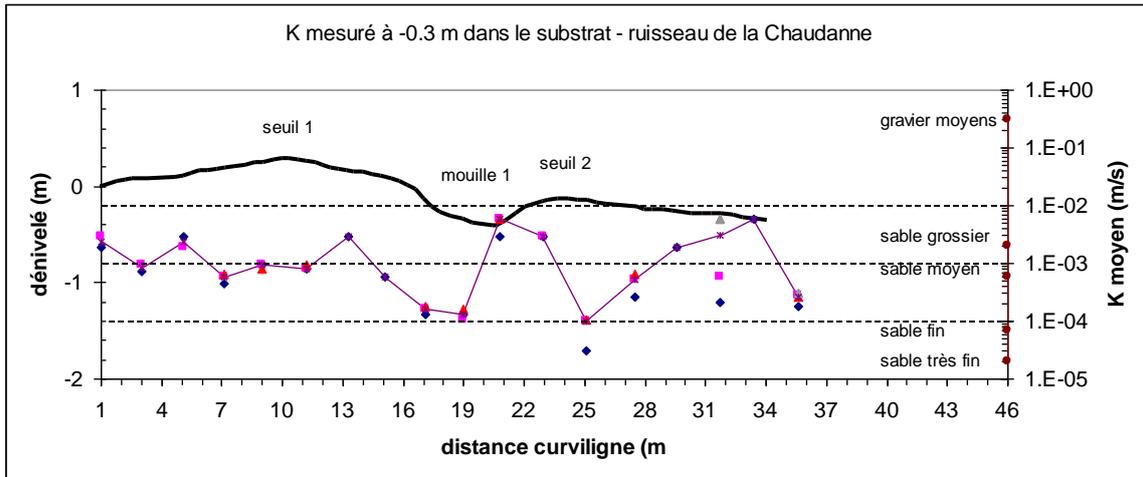


Fig 5 : Valeurs des conductivités hydrauliques mesurées le long du bief du ruisseau de la Chaudanne.

Ce résultat peut s'interpréter par la zone de ressaut hydraulique ou un écoulement turbulent permet la dissipation de l'énergie hydraulique en fin de rupture de pente topographique. Les particules auraient alors tendance à sortir moins facilement des structures poreuses dans cette zone particulière de remous et pourraient en favoriser le colmatage par l'intérieur. L'hypothèse d'un colmatage par des fines venant de l'extérieur est plus difficile à concevoir compte tenu du fait que les pentes locales favorisent plutôt leur évacuation à faible débit.

Un premier schéma de circulation hyporhéique peut être dégagé depuis ces observations. Les zones en grisé représentent les endroits où la valeur de K baisse avant que le flux hyporhéique ne rejoigne l'eau de surface.

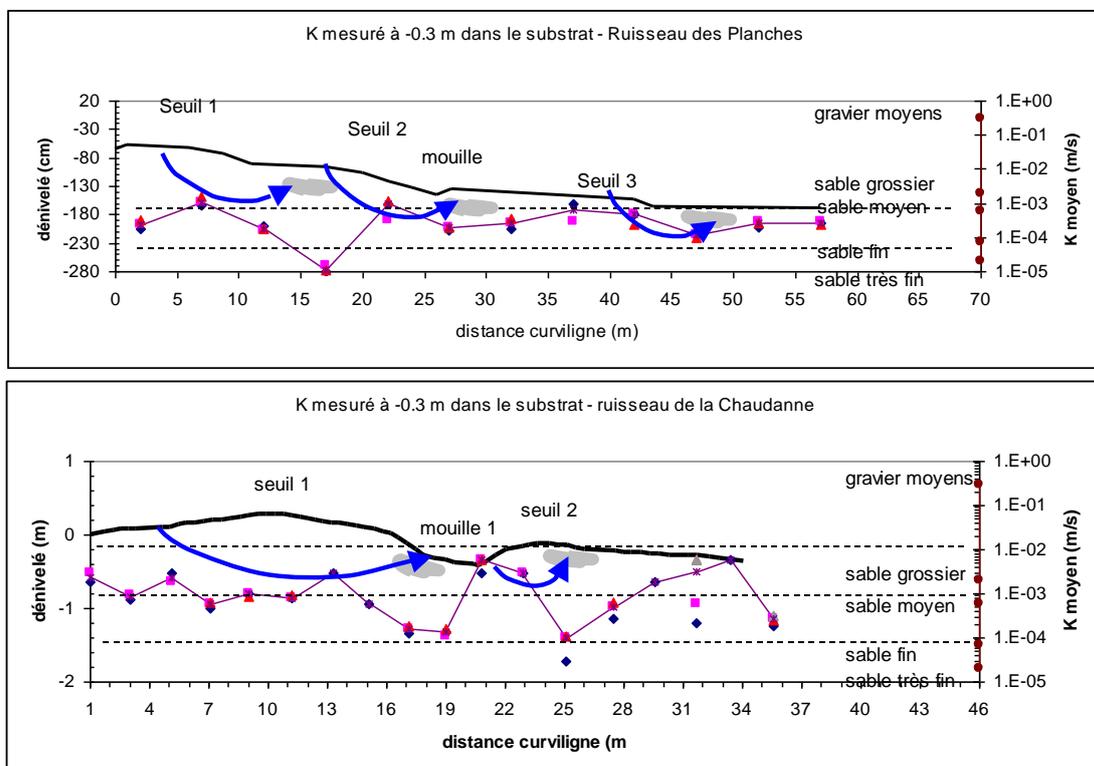


Fig.6 : Illustration des zones de stockage des particules fines en liens avec les flux hyporhéiques. Sites d'étude.

Dans le tableau suivant (Tab.2) sont synthétisés les tendances qui se dégagent des deux sites d'étude pour les valeurs de K selon les faciès morphologiques.

| Kmoy(m/s) | Planche | Chaudanne |
|-----------|---------|-----------|
| Plat      | 2.0E-04 | 2.5E-03   |
| Seuil     | 1.0E-03 | 1.0E-03   |
| Mouille   | 1.9E-04 | 1.3E-04   |

Tableau 2 : valeurs moyennes de K échantillonnées sur les deux cours d'eau.

Ces différentes valeurs de K correspondent à des granulométries dominantes de référence (cf. Tab.1) de type sables moyens (diamètre moyen = 0.125 mm, porosité moyenne = 30%) pour les plus fortes et sables fins à très fins pour les plus faibles (diamètres moyens de 0.09 à 0.045 mm, porosités moyennes de 28% et 24%).

### ***Liaison entre physico-chimie de la zone hyporhéiques et faciès morphologiques***

Cette campagne de reconnaissance n'a concerné que le site de la Chaudanne. Elle a été réalisée en février 2009 à raison d'un échantillonnage tous les 2m de l'aval vers l'amont. Les résultats sont synthétisés sous la forme d'une analyse en composantes principales qui met en évidence les variables qui évoluent ensemble, celles qui s'opposent, celles qui sont indépendantes des autres.

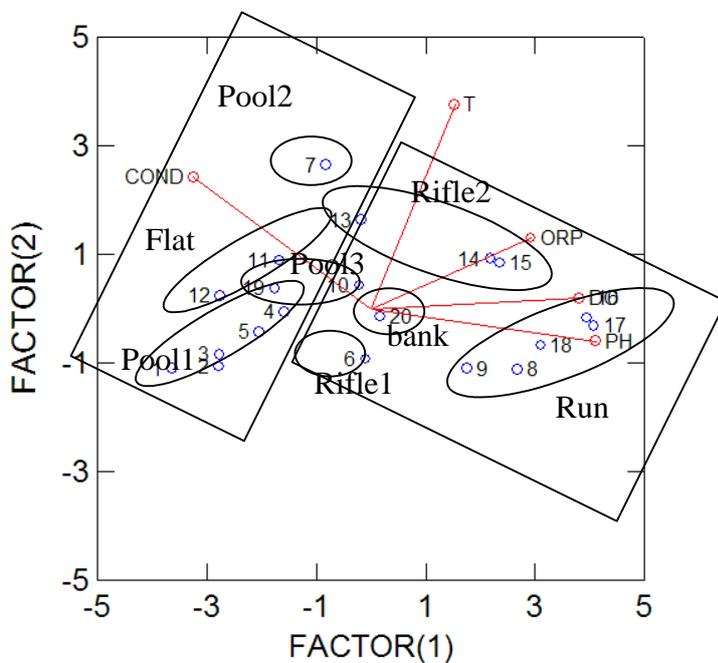


Fig.7 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux hyporhéiques. Site de la Chaudanne (Grézieu la V.).

Le potentiel redox (ORP), l'oxygène dissout (DO) et le pH (PH) covariant et s'opposent à la conductivité électrique (COND). La température (T) est un facteur indépendant qui ne semble pas influencer les autres paramètres physico-chimiques durant cette campagne

Les zones hyporhéiques d'échanges actif sont caractérisées par des valeurs fortes (par rapport à la moyenne des valeurs du site d'étude) en pH, DO et ORP. Les zones à temps de transit long par les valeurs hautes de conductivité. Ainsi le plat n'est pas différencié des mouilles.

## **Données hydrauliques**

### *Débit*

Les débits sont enregistrés par le Cemagref sur le site de la Chaudanne dans le cadre de l'OTHU. Aucune donnée de débit n'est disponible pour le ruisseau des Planches.

Pour chaque site on note la position de la ligne d'eau. Le temps de transit de l'eau hyporhéique dans le substrat de ce faciès est estimé par la loi de Darcy (Eq 2). On obtient en tenant compte de la porosité moyenne le temps estimé de transit d'un soluté dans les faciès « seuil ».

Quatre sondes de pressions permettant une mesure en continue ont été implantées à -0.3m dans le substrat autour du seuil 2 (fig.1).

Sur les deux sites les lignes d'eau ont été relevées pendant les campagnes topographiques. La ligne d'eau est considérée en première approximation (Tonina 2007) comme un bon moyen de calculer le gradient hydraulique. Dans le principe, le gradient sera d'autant plus fort que la ligne d'eau sera courbée. Les courbures les plus accentuées sont situées autour des seuils naturels (on exclut ici les chutes d'eau) comme l'indiquent les figures 5 et 6. On se propose donc de calculer le temps mis par un soluté ou même des matières en suspension de 50 micro-mètres par exemple (Benamar *et al.* 2005) pour traverser le substrat selon le gradient le plus fort. Ce principe est illustré en encadré dans les figures 5 et 6.

## **Calcul du temps de transit des flux hyporhéiques dans les seuils**

-Pour le ruisseau des Planches, le faible débit n'a pas permis une prise de ligne d'eau continue représentative. En effet, sur les plats le courant peut se diviser et la ligne d'eau reste très influencée par la rugosité. Des points ont été relevés au niveau des ruptures topographiques majeures et secondaires qui sont des contrôles hydrauliques pour les débits moyens. La ligne est figurée en pointillés entre ces points mais non mesurées.

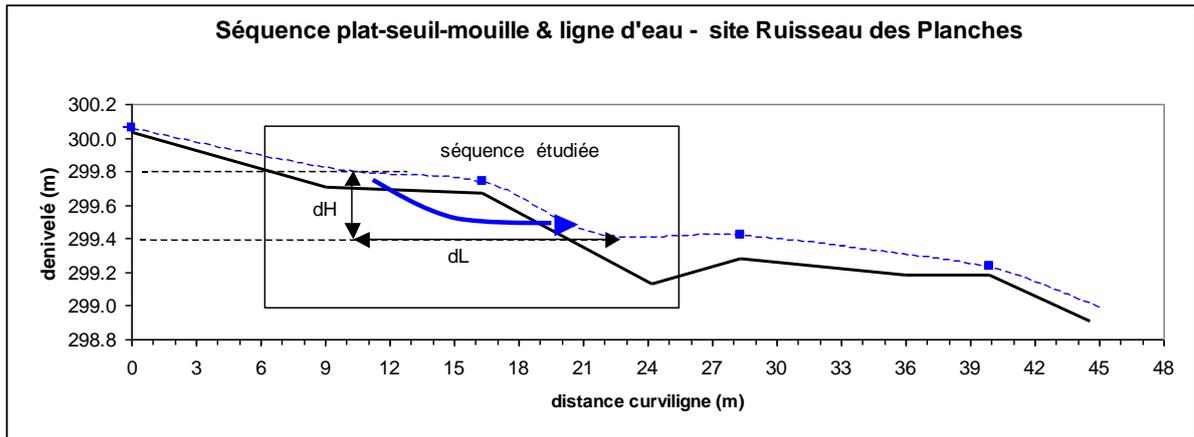


Fig 5 : Points de ligne d'eau sur le ruisseau des Planches

-Pour le site de la Chaudanne, la prise de ligne d'eau s'est avérée plus aisée en raison d'une macro-rugosité moins développée que sur le site d'Ecully.

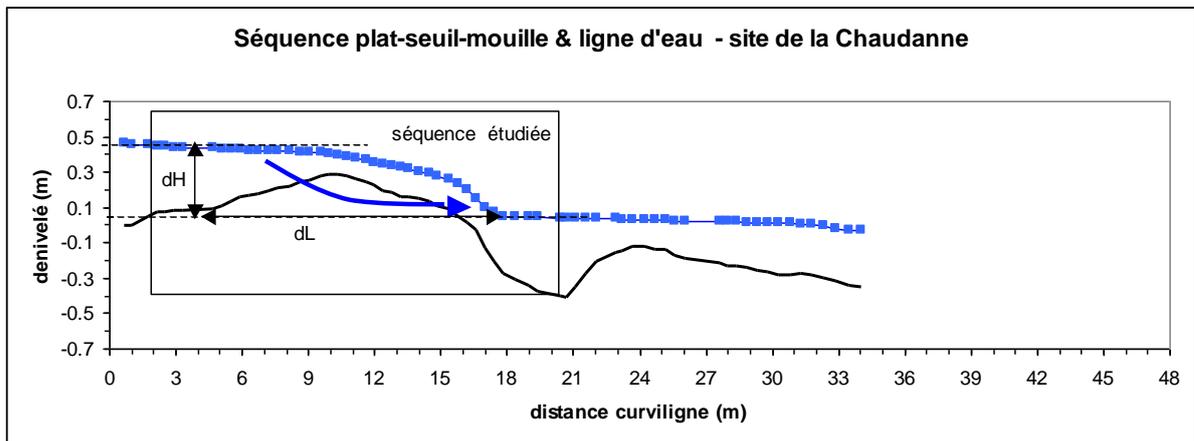


Fig 6 : Points de ligne d'eau sur le ruisseau de la Chaudanne.

Les temps de transit d'un soluté dans les seuils sélectionnés pour les deux sites et dans les conditions de débit qui correspondent aux lignes d'eau utilisées sont :

Pour  $K = 1^E-3$  m/s et porosité moyenne = 30%.

Ruisseau des Planches :  $dh = 0.4m$  ;  $dL = 12m$  ;  $q$  spécifique =  $3.34 E-5$  m/s.

$V = 9.6$  m/j, soit pour les 12 m de substrat à traverser une durée de 30 heures.

Ruisseau de la Chaudanne :  $dh = 0.4m$  ;  $dL = 13.5m$  ;  $q$  spécifique =  $9.5 E-6$  m/s.

$V = 2.7$  m/j, soit pour les 13.5 m de substrat à traverser une durée de 64 heures.

Les deux seuils sélectionnés se révèlent être relativement proches sur le plan des propriétés physiques. La Chaudanne présente une pente moyenne plus faible mais une  $K$  moyenne plus forte que le ruisseau des Planches.

Il reste que c'est la variabilité temporelle de la ligne d'eau qui impose les temps de transit en variant avec les débits.

Pour la Chaudanne, il est possible d'avoir une perception dynamique de la vitesse de transit (Fig.7). Nous utilisons pour cela un suivi en continu d'une année de la ligne d'eau. Dans la figure suivante, seule les gradients mesurés avec un débit non nul sont représentés. Le cas des gradients hors débit est aussi intéressant à traiter pour étudier le devenir des polluants liés aux des rejets de temps pluie mais cela constitue une autre problématique en terme d'approche hydraulique. Les débits nuls peuvent représenter 40% du temps en moyenne sur une année pour les petits cours de l'Ouest lyonnais. Dans ce type de graphique il convient d'interpréter les débits en fonction de leur durée et continuité sur un cycle hydrologique. Ainsi les débits de crue ne peuvent excéder quelques jours en continue. Le débit dominant de la Chaudanne dans le temps, au point d'étude, est de 0.03 m<sup>3</sup>/s. Cette gamme de débit (25 à 35 l/s) peut se maintenir plusieurs dizaines de jours. Pour ce débit, le temps de transit à une réalité physique.

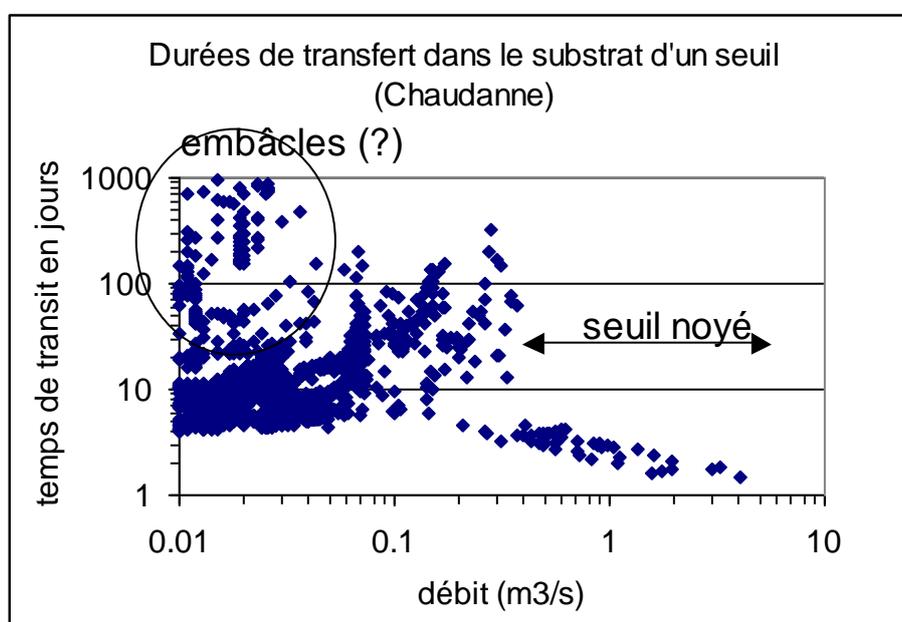


Fig 7 : Temps de transfert d'un soluté dans un seuil de cours d'eau

On observe que les temps sont courts pour les forts débits, de l'ordre de 1.5 à 2 jours et peuvent varier entre 10 et 100 jours pour les débits faibles à moyens. Les durées de 100 à 1000 jours n'ont pas de réalité temporelle : ces valeurs correspondent à des lignes d'eau très planes (gradient faible) associées à des débits faibles. Il peut s'agir d'embâcles consécutifs à des crues mais leur durée de vie n'est souvent que de quelques semaines, jusqu'à une prochaine crue. Pour les forts débits, la pente de la ligne d'eau n'est plus contrôlée par le seuil qui est alors dit « noyé ».

Il convient d'ajouter que l'hypothèse réaliste d'une conductivité hydraulique moyenne de 0.001 m/s est applicable aux seuils naturels. Des trajets et temps de séjour plus longs sont vraisemblables dans les autres faciès morphologiques.

## **Discussion**

L'effet de la température de l'eau sur la vitesse d'écoulement en milieu poreux n'est pas négligeable. Ainsi entre des eaux à 5°C et à 30°C, la conductivité hydraulique est pratiquement doublée. Pour le site de Chaudanne par exemple, la température hyporéique varie de 7 à 16 degrés entre l'hiver et l'été et la vitesse de circulation de l'eau dans le substrat pourrait augmenter de 30 à 40% lors des rejets urbains estivaux.

Selon la difficulté de l'enfoncement à la masse des piézomètres métalliques utilisés pour les nombreux slug-tests réalisés, il est possible d'interpréter la granulométrie verticale des matériaux du lit. Ainsi pour les mouilles, il est très souvent constaté un arrêt d'enfoncement dès les premiers 20 cm, après le passage dans une couche de sédiments fins, puis l'inclinaison du piézomètres qui sous l'effet des coups de masse tend à glisser le long de blocs inamovibles dont la taille est sans doute pluri-décimétriques. Ce cas peut se rencontrer de manière moins fréquente dans les faciès de type plat. Un phénomène contraire se produit sur les seuils : après avoir fait riper les blocs de surface sous l'effet des coups de masse sur le piézomètre métallique, l'enfoncement devient plus aisé avec parfois des « chutes » du piézomètre qui progresse de 10 cm d'un coup. Ces chutes sont interprétées comme des poches de sables et non de sédiments plus fin étant donnée les conductivités hydrauliques mesurées.

Ces constatations permettent de faire une hypothèse sur la structure granulométrique verticale et son implication sur les flux hyporhéiques dans un petits cours d'eau. L'hydrodynamique des flux hyporhéiques dans un cours d'eau est pilotée par trois facteurs essentiels : les gradients hydrauliques qui sont déterminés par la ligne d'eau (en première approximation), la topographie du lit et la conductivité hydraulique du substrat. Ces facteurs ne sont pas totalement indépendants les uns des autres : la topographie du lit est organisée en faciès hydro-géomorphologiques façonnés par le transport des matériaux sous l'effet des forces tractrices liées aux débits. Ces forces augmentent lors des crues (figure X).

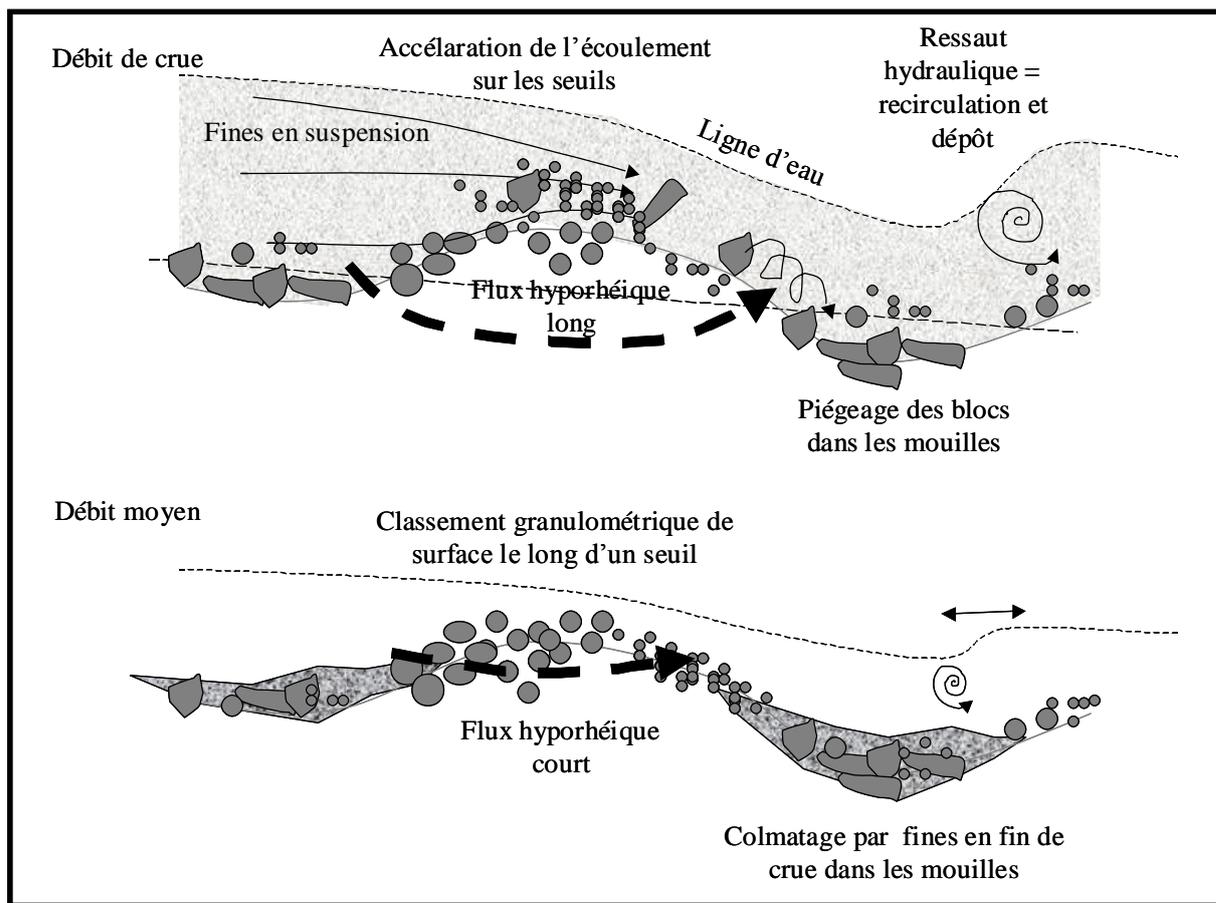


Figure 8 :

Hypothèse d'évolution temporelle et spatiale de la conductivité hydraulique autour d'une séquence seuil-mouille. Implication sur les flux hyporhéiques.

Il s'ensuit un classement granulométrique qui caractérise les faciès d'écoulement et qui conditionne la perméabilité<sup>2</sup> du substrat associé. Il convient de comprendre que les faciès à granulométrie grossière sont structurés lors des crues et se stabilisent durant la baisse de débit. Les fractions granulométriques plus fines viennent alors se déposer dans les faciès à vitesse d'écoulement lente (dit lenthiques) comme les « mouilles » où la dissipation d'énergie permet la décantation des particules fines. La figure suivante illustre

En milieu naturel, la vitesse d'écoulement dans les berges est de quelques centimètres par jour contre quelques mètres dans le substrat poreux du lit selon sa nature. Cela tient à l'hydromorphogénèse de la plaine d'inondation où en raison des faibles vitesses d'écoulement, seul les particules fines arrivent et sédimentent. D'anciens chenaux d'écoulement abandonnés lors de crues majeures puis progressivement comblés peuvent néanmoins maintenir des circulations hyporhéiques par la présence de matériaux plus grossiers. L'existence d'un tel corridor hyporhéique développé autour d'un cours d'eau implique une vallée large héritée de la divagation du cours d'eau. Ce n'est pas le cas des cours d'eau encaissés dans des vallées étroites. Ainsi, la

<sup>2</sup> La perméabilité est une propriété intrinsèque d'un matériau poreux. Elle traduit la connectivité entre les pores de ce matériau. La conductivité hydraulique caractérise la perméabilité pour un liquide donné et les conditions de température et de pression associées.

pente moyenne et la largeur de vallée vont déterminer le développement de faciès plutôt latéraux ou verticaux. Dès lors qu'un cours d'eau peut développer une sinuosité, il est possible d'observer des bancs « d'atterrissement » de plusieurs mètres de long, constitués de blocs, graviers et sables, occupant 1/3 du lit mineur. Ces bancs latéraux de plusieurs mètres de longueur et situés dans la partie interne des courbures en plan du cours d'eau sont formés pendant les crues. En débit moyen à faible, ils sont en partie exondés mais présentent une forte perméabilité, proche de  $1^E-2$  m/s. Ils constituent donc des filtres hyporhéiques d'importance pour ce type de rivière comme c'est le cas pour l'Yzeron aval.

### ***Premières conclusions***

Les travaux réalisés sur des sites expérimentaux et leur modélisation conduisent aux principales conclusions suivantes :

Les échanges rapides entre la colonne d'eau et le substrat sont localisés aux alentours des ruptures topographiques convexes ou seuil morphologiques.

Les échanges dans ces ruptures sont persistants et relativement constants dans le temps par comparaison aux échanges latéraux entre le cours d'eau et sa nappe d'accompagnement.

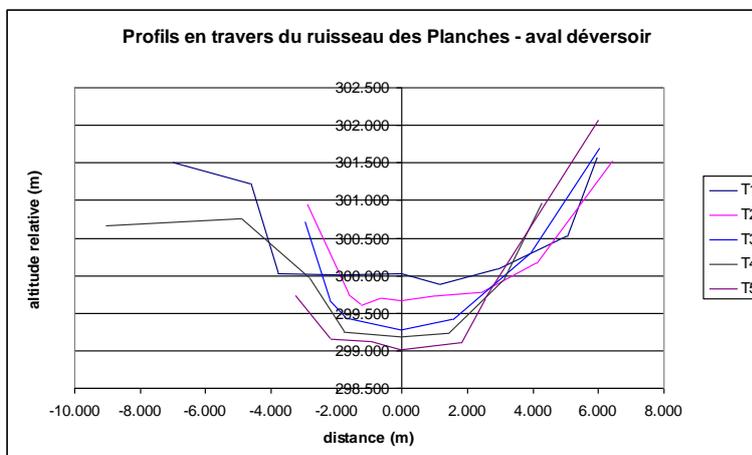
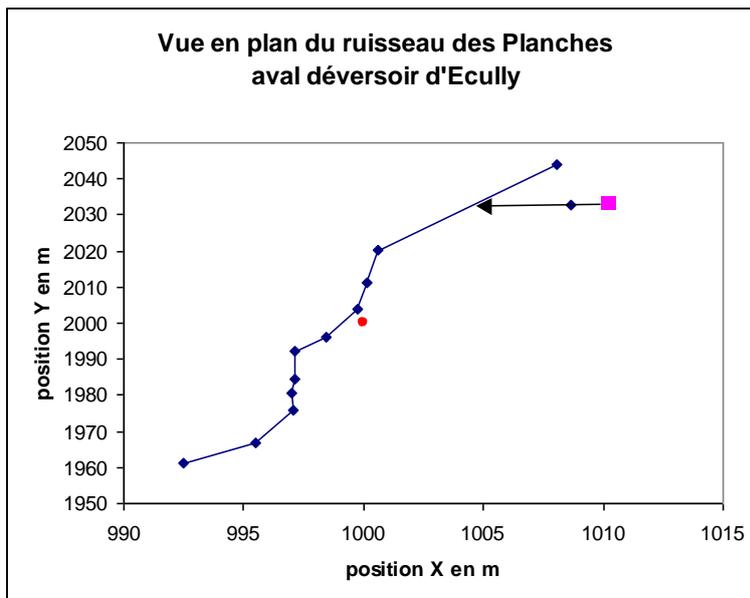
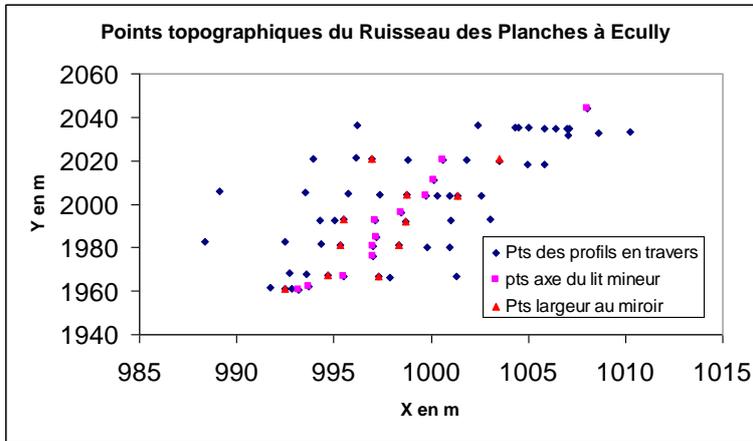
Les gradients hydrauliques augmentent avec le débit dans le lit mineur mais peuvent baisser dès lors qu'un seuil passe en régime noyé.

Les échanges augmentent avec la pente moyenne du cours d'eau

Les échanges augmentent avec la fréquence des seuils dans le profil en long.

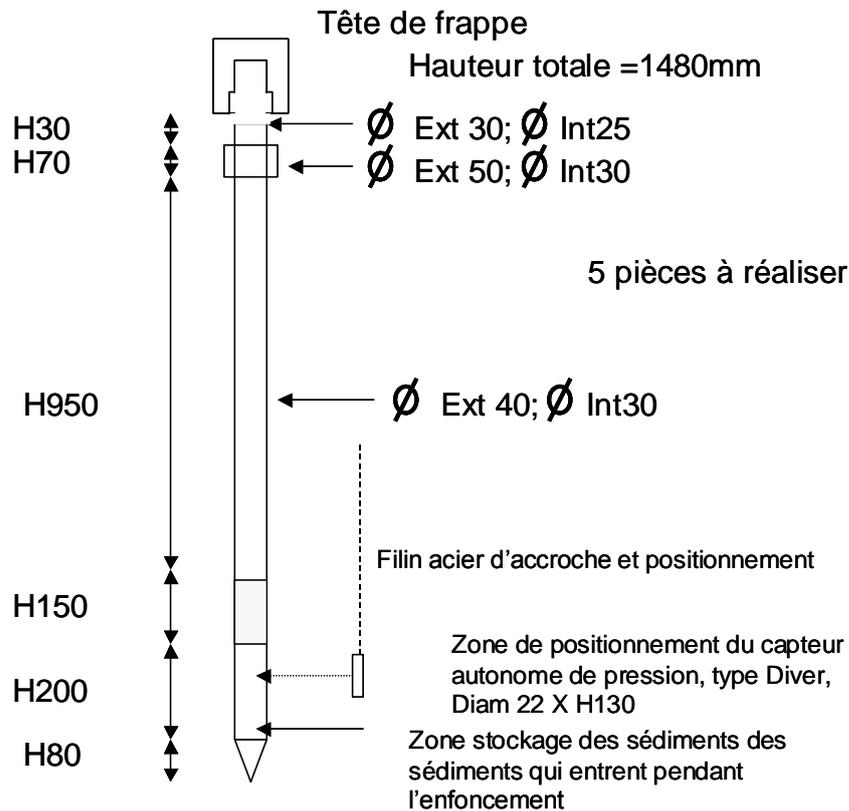
Annexes A à D de l'annexe 1 (partie hydraulique)

**Annexe A : Semi de points topographiques, vue en plan et profils en travers du ruisseau des Planches (Ecully, 69)**



## Annexe B : Matériel pour Slug-tests

Le piézomètre est réalisé par un métallier. Le métal a une épaisseur de 4 mm pour résister aux coups de masse lors du fonçage dans le substrat. Les trous de la crépine sont échancrés vers le haut afin de faciliter le glissement des sédiments plutôt que le compactage.



Pour la sonde d'acquisition à fréquence rapide, voir le site : <http://www.sdec-france.com/>

### **Annexe C : Valeurs mesurées de la conductivité hydraulique K.**

Les mesures sont réalisées de l'aval vers l'amont. D'une manière générale, il est pratiqué 3 slug-tests au même endroit pour juger d'un dé-colmatage possible de la crépine après le premier essai. Il peut s'avérer que la vitesse d'infiltration soit plus rapide que la possibilité de remplissage du piézomètre. Dans ce cas un seul essai est pratiqué. La valeur de K est alors sous estimée. Le test donne une valeur par défaut.

Ruisseau des Planches (Ecully , 69)

| Distance (m) | K essai1 | K essai2 | K essai3 | K essai4 | K50      | Kmin     | Kmax     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0            | 2.72E-04 | 2.93E-04 | 2.38E-04 |          | 2.72E-04 | 2.38E-04 | 2.93E-04 |
| 5            | 1.87E-04 | 2.93E-04 | 2.60E-04 |          | 2.60E-04 | 1.87E-04 | 2.93E-04 |
| 10           | 1.28E-04 | 1.25E-04 | 9.60E-05 |          | 1.25E-04 | 9.60E-05 | 1.28E-04 |
| 15           | 4.97E-04 | 4.97E-04 | 2.48E-04 |          | 4.97E-04 | 2.48E-04 | 4.97E-04 |
| 20           | 9.52E-04 | 3.01E-04 |          |          | 6.26E-04 | 3.01E-04 | 9.52E-04 |
| 25           | 1.78E-04 | 2.54E-04 | 3.57E-04 |          | 2.54E-04 | 1.78E-04 | 3.57E-04 |
| 30           | 1.59E-04 | 1.90E-04 | 1.97E-04 |          | 1.90E-04 | 1.59E-04 | 1.97E-04 |
| 35           | 9.52E-04 | 3.36E-04 | 1.14E-03 |          | 9.52E-04 | 3.36E-04 | 1.14E-03 |
| 40           | 1.04E-05 | 1.56E-05 | 1.09E-05 |          | 1.09E-05 | 1.04E-05 | 1.56E-05 |
| 45           | 2.15E-04 | 1.54E-04 | 1.84E-04 |          | 1.84E-04 | 1.54E-04 | 2.15E-04 |
| 50           | 8.78E-04 | 1.04E-03 | 1.63E-03 |          | 1.04E-03 | 8.78E-04 | 1.63E-03 |
| 55           | 1.73E-04 | 2.43E-04 | 3.26E-04 |          | 2.43E-04 | 1.73E-04 | 3.26E-04 |

Ruisseau de la Chaudanne (Grézieu la Varenne , 69), site amont

| Distance (m) | K essai1 | K essai2 | K essai3 | K essai4 | Kmédian  | Kmin     | Kmax     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1            | 1.79E-04 | 2.72E-04 | 2.60E-04 | 3.09E-04 | 2.66E-04 | 1.79E-04 | 3.09E-04 |
| 3            | 5.71E-03 |          |          |          | 5.71E-03 | 5.71E-03 | 5.71E-03 |
| 5            | 2.11E-04 | 5.71E-04 | 5.71E-03 | 5.71E-03 | 3.14E-03 | 2.11E-04 | 5.71E-03 |
| 7            | 1.90E-03 |          |          |          | 1.90E-03 | 1.90E-03 | 1.90E-03 |
| 9            | 2.66E-04 | 5.19E-04 | 6.34E-04 |          | 5.19E-04 | 2.66E-04 | 6.34E-04 |
| 11           | 3.01E-05 | 1.00E-04 | 1.08E-04 |          | 1.00E-04 | 3.01E-05 | 1.08E-04 |
| 13           | 2.85E-03 | 2.85E-03 |          |          | 2.85E-03 | 2.85E-03 | 2.85E-03 |
| 15           | 2.85E-03 | 5.71E-03 | 5.71E-03 |          | 5.71E-03 | 2.85E-03 | 5.71E-03 |
| 17           | 1.31E-04 | 1.07E-04 | 1.59E-04 |          | 1.31E-04 | 1.07E-04 | 1.59E-04 |
| 19           | 1.30E-04 | 1.59E-04 | 1.78E-04 |          | 1.59E-04 | 1.30E-04 | 1.78E-04 |
| 21           | 5.71E-04 |          |          |          | 5.71E-04 | 5.71E-04 | 5.71E-04 |
| 23           | 2.85E-03 |          |          |          | 2.85E-03 | 2.85E-03 | 2.85E-03 |
| 25           | 8.16E-04 | 8.16E-04 | 9.52E-04 |          | 8.16E-04 | 8.16E-04 | 9.52E-04 |
| 27           | 9.70E-04 | 9.70E-04 | 8.27E-04 |          | 9.70E-04 | 8.27E-04 | 9.70E-04 |
| 29           | 4.58E-04 | 5.71E-04 | 6.34E-04 |          | 5.71E-04 | 4.58E-04 | 6.34E-04 |
| 31           | 2.85E-03 | 1.90E-03 |          |          | 2.38E-03 | 1.90E-03 | 2.85E-03 |
| 33           | 7.14E-04 | 9.52E-04 |          |          | 8.33E-04 | 7.14E-04 | 9.52E-04 |
| 35           | 1.90E-03 | 2.85E-03 |          |          | 2.38E-03 | 1.90E-03 | 2.85E-03 |

## **Annexe D : Références citées dans l'étude hydrologique détaillée**

- Benamar A., Wang H., Ahfir N., Alem A., Masséi N., Dupont J.P. (2005) Effets de la vitesse d'écoulement sur le transport et la cinétique de dépôt de particules en suspension en milieu poreux saturé. Académie des sciences. Elsevier SAS. doi:10.1016/j.crte.2004.12.002.
- Sawyer, A. H., Cardenas M.B. (2009) Hyporheic flow and residence time distributions in heterogeneous cross-bedded sediment, *Water Resources Research*, 45, W08406, doi:10.1029/2008WR007632.
- Datry, T. ; Dole-Olivier, M.J. ; Marmonier, P. ; Claret, C. ; Perrin, J.F. ; Lafont, M. ; Breil, P. (2008) La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau *Ingénieries - E A T*, n° 54, p. 3-18.
- Haggerty *et al.* (2002) Power-law residence time distribution in the hyporheic zone of a 2nd-order mountain stream. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, N°. 13, 10.1029/2002GL014743, 2002
- Kretzschmar R., Barmettler K., Grolimund D., Yan Y., Borkovec M., Sticher H. (1997) Experimental determination of colloid deposition rates and collision efficiencies in natural porous media. *Water resources research*, vol. 33, no. 5, 1129-1137.
- Tonina D., Buffington J.M. (2007) Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling. *Water Resources Research*, Vol. 43, W01421, doi:10.1029/2005WR004328, 2007

**ANNEXE 2**  
**Résultats détaillés des essais d'écotoxicité**

**Essai Ostracodes - *H. incongruens***

| Témoin            | taille à J+6 |     |     |     |     |     |                   |
|-------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------|
|                   | P1           | P2  | P3  | P4  | P5  | P6  |                   |
|                   | 400          | 650 | 600 | 500 | 550 | 750 |                   |
|                   | 450          | 600 | 450 | 450 | 750 | 450 |                   |
|                   | 500          | 400 | 450 | 400 | 550 | 800 |                   |
|                   | 400          | 600 | 450 | 550 | 550 | 800 |                   |
|                   | 500          | 450 | 650 | 550 | 600 | 750 |                   |
|                   | 650          | 400 | 450 | 400 | 600 | 700 |                   |
|                   | 600          | 400 | 450 | 400 | 650 | 550 |                   |
|                   | 400          | 550 | 450 |     | 650 | 600 |                   |
|                   | 600          | 600 | 650 |     |     | 500 |                   |
|                   | 400          | 550 | 600 |     |     |     |                   |
| <b>n =</b>        | 10           | 10  | 10  | 7   | 8   | 9   | 9,0               |
| <b>taille moy</b> | 490          | 520 | 520 | 464 | 613 | 656 | 544 $\mu\text{m}$ |

| Ech. 6            | taille à J+6 |     |     |       |       |     |                   |
|-------------------|--------------|-----|-----|-------|-------|-----|-------------------|
|                   | P1           | P2  | P3  | P4    | P5    | P6  |                   |
|                   | 750          | 550 | 750 | 800   | 750   | 700 |                   |
|                   | 800          | 550 | 750 | 800   | 700   | 550 |                   |
|                   | 500          | 700 | 700 | 750   | 800   | 550 |                   |
|                   | 800          | 700 | 700 | 800   | 800   | 750 |                   |
|                   | 750          | 600 | 550 | 800   | 750   | 800 |                   |
|                   | 750          | 750 | 700 | 1 100 | 850   | 550 |                   |
|                   | 550          | 700 | 750 | 800   | 800   | 800 |                   |
|                   | 750          | 700 | 750 | 750   | 750   | 550 |                   |
|                   | 750          | 500 | 700 | 850   | 800   | 750 |                   |
|                   | 600          | 550 | 800 | 900   | 1 000 | 500 |                   |
| <b>n =</b>        | 10           | 10  | 10  | 10    | 10    | 10  | 10,0              |
| <b>taille moy</b> | 700          | 630 | 715 | 835   | 800   | 650 | 722 $\mu\text{m}$ |

| Ech. 7 | taille à J+6 |     |     |     |     |     |
|--------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | P1           | P2  | P3  | P4  | P5  | P6  |
|        | 600          | 550 | 850 | 850 | 800 | 600 |
|        | 550          | 600 | 600 | 900 | 650 | 800 |
|        | 450          | 800 | 600 | 650 | 450 | 850 |
|        | 850          | 750 | 850 | 900 | 450 | 600 |

|                   |                     |           |           |           |           |           |                     |
|-------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
|                   | 600                 | 600       | 550       | 850       | 600       | 850       |                     |
|                   | 600                 | 800       | 450       | 800       | 550       | 750       |                     |
|                   | 900                 | 850       | 600       | 850       | 650       | 950       |                     |
|                   | 1 150               | 850       | 650       | 550       | 800       | 650       |                     |
|                   | 750                 | 600       | 400       | 550       | 600       | 550       |                     |
|                   | 850                 | 850       | 650       | 1 050     | 700       |           |                     |
| <b>n =</b>        | 10                  | 10        | 10        | 10        | 10        | 9         | 9,8                 |
| <b>taille moy</b> | 730                 | 725       | 620       | 795       | 625       | 733       | 704 $\mu\text{m}$   |
| <b>Ech. 8</b>     | <b>taille à J+6</b> |           |           |           |           |           |                     |
|                   | <b>P1</b>           | <b>P2</b> | <b>P3</b> | <b>P4</b> | <b>P5</b> | <b>P6</b> |                     |
|                   | 800                 | 750       | 800       | 800       | 800       | 850       |                     |
|                   | 750                 | 800       | 550       | 750       | 800       | 750       |                     |
|                   | 850                 | 800       | 550       | 900       | 800       | 700       |                     |
|                   | 600                 | 850       | 750       | 750       | 600       | 750       |                     |
|                   | 800                 | 1 100     | 600       | 700       | 850       | 850       |                     |
|                   | 850                 | 650       | 600       | 850       | 800       | 850       |                     |
|                   | 800                 | 750       | 650       | 800       | 850       | 600       |                     |
|                   | 800                 | 850       | 800       | 900       | 450       | 850       |                     |
|                   | 550                 | 800       | 800       | 650       | 750       | 550       |                     |
|                   | 800                 | 800       | 850       |           | 850       | 750       |                     |
| <b>n =</b>        | 10                  | 10        | 10        | 9         | 10        | 10        | 9,8                 |
| <b>taille moy</b> | 760                 | 815       | 695       | 789       | 755       | 750       | 760 $\mu\text{m}$   |
| <b>Ech. 9</b>     | <b>taille à J+6</b> |           |           |           |           |           |                     |
|                   | <b>P1</b>           | <b>P2</b> | <b>P3</b> | <b>P4</b> | <b>P5</b> | <b>P6</b> |                     |
|                   | 600                 | 1 200     | 1 200     | 1 200     | 650       | 1 350     |                     |
|                   | 750                 | 1 200     | 700       | 1 250     | 750       | 1 150     |                     |
|                   | 1 150               | 1 250     | 1 300     | 1 200     | 850       | 1 300     |                     |
|                   | 750                 | 1 200     | 1 150     | 1 200     | 850       | 1 200     |                     |
|                   | 650                 | 1 150     | 850       | 1 200     | 850       | 1 150     |                     |
|                   | 850                 | 1 200     | 900       | 1 250     | 900       | 1 300     |                     |
|                   | 550                 | 1 200     | 950       | 1 300     | 950       | 1 300     |                     |
|                   | 600                 | 1 250     | 850       | 1 150     | 850       | 1 150     |                     |
|                   | 900                 | 1 200     | 850       | 1 250     | 900       | 1 150     |                     |
|                   |                     |           |           | 1 150     |           | 950       |                     |
| <b>n =</b>        | 9                   | 9         | 9         | 10        | 9         | 10        | 9,3                 |
| <b>taille moy</b> | 756                 | 1 206     | 972       | 1 215     | 839       | 1 200     | 1 038 $\mu\text{m}$ |

## Essai Algues - *P. subcapitata* 72h

Echantillon 1

| Concentrations<br>(%)    | Concentrations<br>algales ( $10^{+6}$<br>cellules/ml) |             | Biomasse<br>intégrale | Facteur de<br>croissance |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|--------------------------|
|                          | T 0                                                   | T +<br>72h  |                       |                          |
| durée (jours)            | 0                                                     | 3           |                       |                          |
| durée (heures)           | 0                                                     | 72          |                       |                          |
| Blanc 1                  | 0,0<br>8                                              | 6,20        | --                    | 86                       |
| Blanc 2                  | 0,0<br>8                                              | 7,30        |                       |                          |
| Blanc 3                  | 0,0<br>8                                              | 7,20        |                       |                          |
| Blanc 4                  | 0,0<br>8                                              | 7,50        |                       |                          |
| Blanc 5                  | 0,0<br>8                                              | 6,30        |                       |                          |
| Blanc 6                  | 0,0<br>8                                              | 6,80        |                       |                          |
| Blanc moyen              | 0,0<br>8                                              | 6,88        |                       |                          |
| Aire à $t_x$             | -                                                     | -           |                       | inhibition<br>(%)        |
| Tx croissance            | -                                                     | <b>1,48</b> |                       |                          |
| replicat 1               | 0,0<br>8                                              | 6,40        | --                    |                          |
| <b>21,5 %</b> replicat 2 | 0,0<br>8                                              | 7,60        |                       |                          |
| replicat 3               | 0,0<br>8                                              | 5,90        |                       |                          |
| moyenne                  | 0,0<br>8                                              | 6,63        |                       |                          |
| Aire à tx                | -                                                     | -           |                       | --                       |
| Tx croissance            | -                                                     | <b>1,47</b> |                       | 0,83%                    |
| replicat 1               | 0,0<br>8                                              | 6,90        | --                    |                          |
| <b>28,0 %</b> replicat 2 | 0,0<br>8                                              | 7,50        |                       |                          |
| replicat 3               | 0,0<br>8                                              | 6,80        |                       |                          |
| moyenne                  | 0,0<br>8                                              | 7,07        |                       |                          |

|                          |      |             |   |        |
|--------------------------|------|-------------|---|--------|
| Aire à tx                | -    | -           | - | -      |
| Tx croissance            | -    | <b>1,49</b> |   | -0,59% |
| replicat 1               | 0,08 | 7,50        |   |        |
| <b>36,4 %</b> replicat 2 | 0,08 | 8,30        | - | -      |
| replicat 3               | 0,08 | 7,20        |   |        |
| moyenne                  | 0,08 | 7,67        |   |        |
| Aire à tx                | -    | -           | - | -      |
| Tx croissance            | -    | <b>1,52</b> |   | -2,42% |
| replicat 1               | 0,08 | 3,20        |   |        |
| <b>47,3 %</b> replicat 2 | 0,08 | 6,50        | - | -      |
| replicat 3               | 0,08 | 6,10        |   |        |
| moyenne                  | 0,08 | 5,27        |   |        |
| Aire à tx                | -    | -           | - | -      |
| Tx croissance            | -    | <b>1,40</b> |   | 6,01%  |
| replicat 1               | 0,08 | 7,10        |   |        |
| <b>61,5 %</b> replicat 2 | 0,08 | 6,40        | - | -      |
| replicat 3               | 0,08 | 7,10        |   |        |
| moyenne                  | 0,08 | 6,87        |   |        |
| Aire à tx                | -    | -           | - | -      |
| Tx croissance            | -    | <b>1,48</b> |   | 0,05%  |
| replicat 1               | 0,08 | 6,30        |   |        |
| <b>80%</b> replicat 2    | 0,08 | 6,60        | - | -      |
| replicat 3               | 0,08 | 6,80        |   |        |
| moyenne                  | 0,08 | 6,57        |   |        |

Echantillon 2

|                       |                                                       |         |           |                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|---------|-----------|-----------------------|
| Aire à tx             | -                                                     | -       | -         | -                     |
| Tx croissance         | -                                                     | 1,47    |           | 1,06%                 |
| Concentrations (%)    | Concentrations algales (10 <sup>+6</sup> cellules/ml) |         |           |                       |
|                       | T 0                                                   | T + 72h |           |                       |
| durée (jours)         | 0                                                     | 3       | Biomasse  | Facteur de croissance |
| durée (heures)        | 0                                                     | 72      | intégrale |                       |
| Blanc 1               | 0,08                                                  | 6,20    | -         | 86                    |
| Blanc 2               | 0,08                                                  | 7,30    |           |                       |
| Blanc 3               | 0,08                                                  | 7,20    |           |                       |
| Blanc 4               | 0,08                                                  | 7,50    |           |                       |
| Blanc 5               | 0,08                                                  | 6,30    |           |                       |
| Blanc 6               | 0,08                                                  | 6,80    |           |                       |
| Blanc moyen           | 0,08                                                  | 6,88    |           |                       |
| Aire à t <sub>x</sub> | -                                                     | -       |           | inhibition (%)        |
| Tx croissance         | -                                                     | 1,48    |           |                       |
| replicat 1            | 0,08                                                  | 6,20    | -         |                       |
| 21,5 % replicat 2     | 0,08                                                  | 5,60    |           |                       |
| replicat 3            | 0,08                                                  | 6,20    |           |                       |
| moyenne               | 0,08                                                  | 6,00    |           |                       |
| Aire à tx             | -                                                     | -       |           | -                     |
| Tx croissance         | -                                                     | 1,44    |           | 3,08%                 |
| replicat 1            | 0,08                                                  | 7,90    | -         |                       |
| 28,0 % replicat 2     | 0,08                                                  | 7,30    |           |                       |
| replicat 3            | 0,08                                                  | 7,00    |           |                       |

|               |            |          |             |   |        |
|---------------|------------|----------|-------------|---|--------|
|               | moyenne    | 0,0<br>8 | 7,40        |   |        |
| Aire à tx     |            | -        | -           |   | -      |
| Tx croissance |            | -        | <b>1,51</b> |   | -1,62% |
|               | replicat 1 | 0,0<br>8 | 6,60        |   |        |
| <b>36,4 %</b> | replicat 2 | 0,0<br>8 | 8,40        | - | -      |
|               | replicat 3 | 0,0<br>8 | 7,00        |   |        |
|               | moyenne    | 0,0<br>8 | 7,33        |   |        |
| Aire à tx     |            | -        | -           |   | -      |
| Tx croissance |            | -        | <b>1,51</b> |   | -1,42% |
|               | replicat 1 | 0,0<br>8 | 6,90        |   |        |
| <b>47,3 %</b> | replicat 2 | 0,0<br>8 | 6,20        | - | -      |
|               | replicat 3 | 0,0<br>8 | 7,80        |   |        |
|               | moyenne    | 0,0<br>8 | 6,97        |   |        |
| Aire à tx     |            | -        | -           |   | -      |
| Tx croissance |            | -        | <b>1,49</b> |   | -0,27% |
|               | replicat 1 | 0,0<br>8 | 8,90        |   |        |
| <b>61,5 %</b> | replicat 2 | 0,0<br>8 | 7,20        | - | -      |
|               | replicat 3 | 0,0<br>8 | 7,80        |   |        |
|               | moyenne    | 0,0<br>8 | 7,97        |   |        |
| Aire à tx     |            | -        | -           |   | -      |
| Tx croissance |            | -        | <b>1,53</b> |   | -3,28% |
|               | replicat 1 | 0,0<br>8 | 6,80        |   |        |
| <b>80%</b>    | replicat 2 | 0,0<br>8 | 7,60        | - | -      |
|               | replicat 3 | 0,0<br>8 | 9,40        |   |        |

|               |          |             |  |        |
|---------------|----------|-------------|--|--------|
| moyenne       | 0,0<br>8 | 7,93        |  |        |
| Aire à tx     | -        | -           |  | -      |
| Tx croissance | -        | <b>1,53</b> |  | -3,19% |

|               |                          |                                                       |             |                    |                       |
|---------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|-------------|--------------------|-----------------------|
| Echantillon 3 | Concentrations (%)       | Concentrations algales (10 <sup>+6</sup> cellules/ml) |             |                    |                       |
|               |                          | T 0                                                   | T + 72h     |                    |                       |
|               | durée (jours)            | <b>0</b>                                              | <b>3</b>    | Biomasse intégrale | Facteur de croissance |
|               | durée (heures)           | <b>0</b>                                              | <b>72</b>   |                    |                       |
|               | Blanc 1                  | 0,0<br>8                                              | 6,20        | -                  | 86                    |
|               | Blanc 2                  | 0,0<br>8                                              | 7,30        |                    |                       |
|               | Blanc 3                  | 0,0<br>8                                              | 7,20        |                    |                       |
|               | Blanc 4                  | 0,0<br>8                                              | 7,50        |                    |                       |
|               | Blanc 5                  | 0,0<br>8                                              | 6,30        |                    |                       |
|               | Blanc 6                  | 0,0<br>8                                              | 6,80        |                    |                       |
|               | Blanc moyen              | 0,0<br>8                                              | 6,88        |                    | validé                |
|               | Aire à t <sub>x</sub>    | -                                                     | -           |                    | inhibition (%)        |
|               | Tx croissance            | -                                                     | <b>1,48</b> |                    |                       |
|               | replicat 1               | 0,0<br>8                                              | 8,90        | -                  |                       |
|               | <b>21,5 %</b> replicat 2 | 0,0<br>8                                              | 7,40        |                    |                       |
|               | replicat 3               | 0,0<br>8                                              | 7,70        |                    |                       |
|               | moyenne                  | 0,0<br>8                                              | 8,00        |                    |                       |
|               | Aire à tx                | -                                                     | -           |                    | -                     |
|               | Tx croissance            | -                                                     | <b>1,54</b> |                    | -3,37%                |
|               | replicat 1               | 0,0<br>8                                              | 7,10        | -                  |                       |

|               |            |          |             |     |        |
|---------------|------------|----------|-------------|-----|--------|
| <b>28,0 %</b> | replicat 2 | 0,0<br>8 | 8,30        |     |        |
|               | replicat 3 | 0,0<br>8 | 8,50        |     |        |
|               | moyenne    | 0,0<br>8 | 7,97        |     |        |
| Aire à tx     |            | -        | - -         |     | - -    |
| Tx croissance |            | -        | <b>1,53</b> |     | -3,28% |
|               | replicat 1 | 0,0<br>8 | 6,40        |     |        |
| <b>36,4 %</b> | replicat 2 | 0,0<br>8 | 6,20        | - - |        |
|               | replicat 3 | 0,0<br>8 | 7,80        |     |        |
|               | moyenne    | 0,0<br>8 | 6,80        |     |        |
| Aire à tx     |            | -        | - -         |     | - -    |
| Tx croissance |            | -        | <b>1,48</b> |     | 0,27%  |
|               | replicat 1 | 0,0<br>8 | 7,20        |     |        |
| <b>47,3 %</b> | replicat 2 | 0,0<br>8 | 6,50        | - - |        |
|               | replicat 3 | 0,0<br>8 | 7,10        |     |        |
|               | moyenne    | 0,0<br>8 | 6,93        |     |        |
| Aire à tx     |            | -        | - -         |     | - -    |
| Tx croissance |            | -        | <b>1,49</b> |     | -0,16% |
|               | replicat 1 | 0,0<br>8 | 7,20        |     |        |
| <b>61,5 %</b> | replicat 2 | 0,0<br>8 | 5,50        | - - |        |
|               | replicat 3 | 0,0<br>8 | 5,60        |     |        |
|               | moyenne    | 0,0<br>8 | 6,10        |     |        |
| Aire à tx     |            | -        | - -         |     | - -    |
| Tx croissance |            | -        | <b>1,44</b> |     | 2,71%  |
|               | replicat 1 | 0,0<br>8 | 4,70        | - - |        |

|            |               |          |             |  |       |
|------------|---------------|----------|-------------|--|-------|
| <b>80%</b> | replicat 2    | 0,0<br>8 | 5,10        |  |       |
|            | replicat 3    | 0,0<br>8 | 5,40        |  |       |
|            | moyenne       | 0,0<br>8 | 5,07        |  |       |
|            | Aire à tx     | -        | - -         |  | - -   |
|            | Tx croissance | -        | <b>1,38</b> |  | 6,88% |

## Essai Microtox - *V. fischeri* 15 & 30 min

| Echantillon 1        | I to        | I t5        | BR             | I t15        | BR              | I t 30       | BR              |
|----------------------|-------------|-------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| <b>Blanc 1</b>       | 96          | 90          | 0,93           | 83           | 0,85            | 81           | 0,83            |
| <b>Blanc 2</b>       | 94          | 86          |                | 79           |                 | 77           |                 |
| <b>concentration</b> | <b>I to</b> | <b>I t5</b> | <b>Delta 5</b> | <b>I t15</b> | <b>Delta 15</b> | <b>I t30</b> | <b>Delta 30</b> |
| <b>6,25%</b>         | 91          | 86          | -2,04          | 80           | -3,12           | 77           | -1,77           |
| <b>9,38%</b>         | 87          | 81          | -0,52          | 77           | -3,82           | 71           | 1,85            |
| <b>12,50%</b>        | 94          | 85          | 2,37           | 80           | 0,17            | 77           | 1,48            |
| <b>18,75%</b>        | 91          | 81          | 3,90           | 76           | 2,03            | 74           | 2,20            |
| <b>25,00%</b>        | 90          | 86          | -3,17          | 82           | -6,87           | 76           | -1,56           |
| <b>38,00%</b>        | 83          | 84          | -9,27          | 78           | -10,24          | 73           | -5,78           |
| <b>50,00%</b>        | 92          | 89          | -4,45          | 84           | -7,10           | 78           | -1,97           |
| <b>75,00%</b>        | 90          | 84          | -0,77          | 79           | -2,96           | 75           | -0,23           |

| Echantillon 2        | I to        | I t5        | BR             | I t15        | BR              | I t 30       | BR              |
|----------------------|-------------|-------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| <b>Blanc 1</b>       | 95          | 87          | 0,90           | 83           | 0,86            | 80           | 0,82            |
| <b>Blanc 2</b>       | 98          | 87          |                | 82           |                 | 79           |                 |
| <b>concentration</b> | <b>I to</b> | <b>I t5</b> | <b>Delta 5</b> | <b>I t15</b> | <b>Delta 15</b> | <b>I t30</b> | <b>Delta 30</b> |
| <b>6,25%</b>         | 98          | 91          | -2,97          | 85           | -1,42           | 81           | -0,29           |
| <b>9,38%</b>         | 93          | 86          | -2,55          | 82           | -3,10           | 78           | -1,77           |
| <b>12,50%</b>        | 87          | 80          | -1,97          | 78           | -4,83           | 74           | -3,21           |
| <b>18,75%</b>        | 94          | 88          | -3,81          | 84           | -4,49           | 82           | -5,85           |
| <b>25,00%</b>        | 94          | 87          | -2,63          | 86           | -6,98           | 82           | -5,85           |
| <b>38,00%</b>        | 98          | 90          | -1,84          | 89           | -6,19           | 83           | -2,77           |
| <b>50,00%</b>        | 85          | 82          | -6,98          | 82           | -12,80          | 79           | -12,78          |
| <b>75,00%</b>        | 96          | 86          | 0,66           | 87           | -5,97           | 85           | -7,44           |
| Echantillon 3        | I to        | I t5        | BR             | I t15        | BR              | I t 30       | BR              |
| <b>Blanc 1</b>       | 98          | 91          | 0,90           | 84           | 0,84            | 81           | 0,81            |
| <b>Blanc 2</b>       | 107         | 94          |                | 87           |                 | 84           |                 |
| <b>concentration</b> | <b>I to</b> | <b>I t5</b> | <b>Delta 5</b> | <b>I t15</b> | <b>Delta 15</b> | <b>I t30</b> | <b>Delta 30</b> |
| <b>6,25%</b>         | 95          | 84          | 2,14           | 80           | -0,84           | 77           | -0,59           |
| <b>9,38%</b>         | 87          | 76          | 3,32           | 74           | -1,85           | 72           | -2,71           |
| <b>12,50%</b>        | 83          | 77          | -2,68          | 75           | -8,20           | 73           | -9,15           |
| <b>18,75%</b>        | 80          | 78          | -7,91          | 74           | -10,76          | 71           | -10,14          |
| <b>25,00%</b>        | 78          | 65          | 7,77           | 62           | 4,82            | 60           | 4,54            |

|               |     |     |       |    |       |    |       |
|---------------|-----|-----|-------|----|-------|----|-------|
| <b>38,00%</b> | 84  | 74  | 2,50  | 71 | -1,21 | 68 | -0,46 |
| <b>50,00%</b> | 90  | 77  | 5,31  | 75 | 0,21  | 72 | 0,72  |
| <b>75,00%</b> | 105 | 101 | -6,46 | 95 | -8,34 | 87 | -2,83 |

| Echantillon 4        | I to        | I t5        | BR             | I t15        | BR              | I t 30       | BR              |
|----------------------|-------------|-------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| <b>Blanc 1</b>       | 88          | 79          | 0,90           | 75           | 0,85            | 75           | 0,83            |
| <b>Blanc 2</b>       | 103         | 93          |                | 87           |                 | 84           |                 |
| <b>concentration</b> | <b>I to</b> | <b>I t5</b> | <b>Delta 5</b> | <b>I t15</b> | <b>Delta 15</b> | <b>I t30</b> | <b>Delta 30</b> |
| <b>6,25%</b>         | 83          | 74          | 0,97           | 72           | -2,24           | 68           | 1,75            |
| <b>9,38%</b>         | 88          | 78          | 1,55           | 74           | 0,89            | 71           | 3,25            |
| <b>12,50%</b>        | 83          | 75          | -0,37          | 73           | -3,66           | 68           | 1,75            |
| <b>18,75%</b>        | 78          | 70          | 0,32           | 68           | -2,75           | 65           | 0,07            |
| <b>25,00%</b>        | 75          | 69          | -2,19          | 65           | -2,15           | 62           | 0,87            |
| <b>38,00%</b>        | 78          | 68          | 3,17           | 65           | 1,78            | 63           | 3,14            |
| <b>50,00%</b>        | 80          | 70          | 2,81           | 68           | -0,18           | 64           | 4,07            |
| <b>75,00%</b>        | 85          | 80          | -4,54          | 75           | -3,99           | 69           | 2,65            |

## Essai Rotifères - *Brachionus calyciflorus* 48h

### Echantillon 1

|           | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | moyenne |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---------|
| Témoïn 0% | 3 |   | 4 | 4 | 1 | 3 | 5 | 4 | 3,13    |
| 5,6%      | ♂ |   | 2 | ♂ | ♂ | ♂ | 2 | 4 | 2,50    |
| 11,2%     | 4 |   | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2,75    |
| 22,5%     | 3 |   | 3 | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | 3,00    |
| 45,0%     | 2 |   | 3 | 3 | 3 | ♂ | 2 | 3 | 2,71    |
| 90,0%     | 2 |   | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2,50    |

### Echantillon 2

|           | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | moyenne |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---------|
| Témoïn 0% | 3 |   | 3 | 1 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3,25    |
| 5,6%      | 3 |   | 3 | 5 | 3 | 2 | 3 | 5 | 3,38    |
| 11,2%     | 3 |   | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2,88    |
| 22,5%     | 3 |   | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3,13    |
| 45,0%     | 3 |   | 2 | 3 | 1 | ♂ | ♂ | 3 | 2,14    |
| 90,0%     | 2 |   | 3 | 1 | 0 | ♂ | ♂ | 2 | 1,71    |

REG TOX

CE20 =

31,70%

[ 7,74% - 66,87% ]

### Echantillon 3

|           | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | moyenne |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---------|
| Témoïn 0% | 3 |   | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3,25    |
| 5,6%      | 3 |   | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 2 | 3,13    |
| 11,2%     | 4 |   | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3,38    |
| 22,5%     | 4 |   | 5 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 4,00    |
| 45,0%     | 6 |   | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4,75    |
| 90,0%     | 5 |   | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 4,88    |

### Echantillon 4

|           | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | moyenne |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---------|
| Témoïn 0% | 3 |   | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3,25    |
| 5,6%      | 2 |   | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1,63    |
| 11,2%     | 2 |   | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1,50    |
| 22,5%     | 2 |   | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1,38    |



# Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

---

